

## **Una propuesta sistémica para el análisis de la productividad de un proceso minero aurífero colombiano**

### **A system approach to analyze the productivity of a Colombian gold mining process**

*Carlos Arturo Delgado Álvarez<sup>1</sup>, Santiago Arango Aramburo<sup>1\*</sup>, Antonio Romero Hernández<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Grupo Ciencias de la Decisión, Universidad Nacional de Colombia. Cra 80 # 65-22. Medellín, Colombia.

<sup>2</sup>Grupo GEMMA, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. Cra 80 # 65-223. Medellín, Colombia.

(Recibido el 20 de septiembre de 2013. Aceptado el 25 de marzo de 2014)

#### **Resumen**

El sistema minero aurífero es un sistema complejo caracterizado por las interacciones entre individuos, organizaciones y otras variables que intervienen en su comportamiento. Tal sistema está integrado por los procesos de exploración, extracción, beneficio y comercialización. En el caso colombiano, factores exógenos de tipo social, ambiental, político, económico, tecnológico y organizacional intervienen en el desarrollo y la productividad de dichos procesos, agregándole una mayor complejidad al sistema. Para analizar tal complejidad, se desarrolla un modelo de dinámica de sistemas (DS) que permite la caracterización del sistema y la evaluación de políticas para el mejoramiento de la productividad de un proceso minero aurífero en Colombia. Se presentan simulaciones de diferentes escenarios, donde se observa que políticas de inversión sostenibles incrementan la productividad de dicho proceso. Finalmente, cambios positivos en las actividades generadoras de capital social y la infraestructura física de la región de influencia tienen un impacto positivo sobre la productividad multifactorial del proceso minero aurífero colombiano.

-----*Palabras clave:* Minería aurífera; productividad; dinámica de sistemas

---

\* Autor de correspondencia: Santiago Arango Aramburo, e-mail: saarango@unal.edu.co; teléfono: + 57 4 425 5371 (S. Arango)

## Abstract

Colombian gold mining is a complex system characterized by interactions between individuals, organizations and other variables, which are involved in the system behavior. The gold mining system integrates the exploration, extraction, dressing and commercialization processes. There are exogenous issues that affect the system performance and its productivity, and increase the complexity. These issues are of social, environmental, political, economical, technological and organizational types. In order to analyze this complexity, we develop a system dynamics model that allows characterizing the system and evaluating policies to improve productivity of a Colombian gold mining process. We simulate different scenarios of the model in which we can observe that sustainable investment policies increase the productivity of the gold mining system in Colombia. Increases of social capital promotion activities and physical infrastructure in the region of influence affect positively the multifactorial productivity of the Colombian gold mining process.

-----*Keywords:* Gold mining; productivity; system dynamics

## Introducción

La minería aurífera colombiana se caracteriza por ser la principal fuente generadora de trabajo y de divisas en algunas regiones del país [1, 2]. Algunos ejemplos de estas regiones son: Remedios y Segovia en el departamento de Antioquia, Marmato en Caldas y El Sur de Bolívar [3]. Durante mucho tiempo Colombia fue el primer productor mundial de oro en el siglo XIX [4]. Sin embargo, las cifras existentes de la minería aurífera colombiana permiten concluir que este sector no ha tenido un aporte significativo al producto interno bruto (PIB) del país durante las tres últimas décadas [5]. Algunos autores atribuyen esto a la falta de inversión y a los bajos niveles de productividad del sector [4]. Otros autores agregan, que la informalidad y la ilegalidad de la actividad minera también juegan un rol importante en los bajos índices de producción que se reportan [3, 6].

En 2003, el 94% de la producción nacional aurífera provenía de la pequeña y mediana minería, en su mayoría de tipo artesanal y familiar [4]. Aún hoy en día, la mayoría de la producción aurífera del país proviene de la pequeña y mediana minería [7]. Este tipo de minería se caracteriza por sus bajos índices de productividad e inversión

tecnológica y por las formas rudimentarias para extraer y beneficiar el mineral [8].

Los economistas definen la productividad como el cociente entre el producto final (c.f. outputs) y los recursos utilizados (c.f. inputs) para obtener tal producto [9]. El concepto de productividad se dio a conocer con el trabajo de [10], quien desarrolló el primer índice de productividad utilizando el concepto económico de la función de producción. Desde entonces, el concepto de productividad ha sido ampliamente estudiado y discutido en la literatura [11-17].

La productividad puede ser parcial o multifactorial [16, 18]. Las medidas más comunes de la productividad parcial son la productividad del capital y la productividad laboral [17]. La productividad multifactorial explica la relación entre la cantidad producida y la sumatoria de los efectos causados por los diferentes factores considerados para el análisis. En nuestra investigación, Nosotros hemos considerado un indicador de productividad multifactorial que es definido como el cociente entre los ingresos por producción y el producto ponderado entre el capital de trabajo y el recurso de mano de obra. Esta investigación estudia el impacto de factores exógenos a un proceso minero aurífero

en Colombia sobre su indicador de productividad multifactorial. Los factores que consideramos son: el precio del oro, las relaciones de capital social y la infraestructura vial de la región.

En minería, el índice de productividad ha sido usualmente medido a nivel sectorial [19, 20]. El crecimiento de la productividad en el sector minero ha sido usualmente atribuido a varios factores: el desarrollo tecnológico [19, 21], la innovación y adquisición de nueva maquinaria [19, 21], el precio del mineral [20], el cierre de pequeñas minas ineficientes [22], entre otros.

Son pocos los estudios y modelos relacionados con la productividad de la minería aurífera en específico [20]. La mayor parte se ha centrado en metales como el cobre [23, 24] y la minería carbonífera [22, 25, 26]. Sin embargo, tomando en cuenta que existen algunos aspectos técnicos, económicos y financieros, comunes entre la minería de oro, cobre, y carbón [20], se estudiaron algunos modelos de productividad aplicados a estos dos últimos minerales.

Dentro de la literatura de la minería aurífera propiamente, se encontraron tres artículos relacionados con la productividad del sector. El primero de ellos es un estudio del crecimiento de la productividad y la utilización de la capacidad de la minería aurífera australiana. En esta investigación, [19] utiliza un modelo econométrico para estimar el crecimiento de la productividad. A partir de este modelo, se obtiene una medida del crecimiento de la productividad dependiente de los cambios en los niveles de utilización de la capacidad y de las entradas de producción en el corto plazo. Además, deduce que gran parte de los costos medidos en el crecimiento de la productividad pueden ser atribuidos a los cambios tecnológicos.

El segundo artículo contiene un análisis de la productividad laboral de una mina de oro en Arabia Saudita. Este estudio es realizado por [27], quien estima la productividad laboral como el porcentaje del tiempo que el trabajador dedica al trabajo productivo en el frente de trabajo. El estudio arrojó que los mineros gastan en

promedio el 35.4% del tiempo en actividades improductivas. Estas actividades son: las llegadas tarde, pausas inactivas autorizadas y no autorizadas, el desplazamiento al frente de trabajo y la terminación temprana del turno de trabajo.

Posteriormente, [20] realizó un estudio sobre las tendencias de la productividad de la industria minera aurífera en Canadá. [20] encontró que el comportamiento del precio real del oro, tiene un impacto significativo sobre el crecimiento de la productividad de esta industria.

La mayoría de modelos aplicados a la minería aurífera, carbonífera y cuprífera, están orientados al análisis de la productividad del sector dentro de la economía de un país [23, 26, 19, 20]. Ellos se enfocan en analizar el crecimiento de la productividad del sector y algunos de ellos analizan el impacto de factores exógenos, tales como la tecnología [20]. Adicionalmente, su foco principal no es analizar la evolución de la productividad en periodos futuros, ni permiten hacer análisis de políticas para la toma de decisiones a largo plazo [15].

Ninguno de estos modelos considera el efecto de las relaciones de capital social de una región y la infraestructura vial de la región sobre la productividad de un proceso minero [19-26]. La mayoría son modelos de optimización y econometría. Los primeros son prescriptivos, buscan la mejor combinación de recursos para maximizar la productividad y tienen dificultades para modelar problemas no lineales, retardos y la realimentación del sistema [28]. Mientras los segundos, requieren de la disponibilidad de muchos datos para que sus predicciones sean confiables y requieren que todas las variables utilizadas sean cuantitativas [15].

En este artículo se utiliza la DS como una propuesta alternativa a los modelos ya existentes para estudiar el cambio de la productividad en el tiempo. La DS es una herramienta analítica e interdisciplinaria [29], que permite estudiar y comprender el comportamiento de un sistema determinado por interacciones no lineales entre variables, las estructuras de realimentación y

retardos. En este artículo, se muestra como con la DS se aborda el problema de la medición de la productividad de un sistema minero aurífero desde una visión sistémica y holística para analizar la interacción y la sinergia entre sus componentes y los efectos individuales, reduciendo así la dependencia de la cantidad y la calidad de la información [30]. Estudiar el problema sistémicamente permite analizar los efectos de las decisiones a largo plazo, evaluando sus posibles efectos en la productividad del sistema e identificando los puntos de mayor influencia sobre él, para evitar la resistencia a las políticas. Los modelos son construidos a partir de un proceso cognitivo y la estructuración de un problema para el aprendizaje del comportamiento del sistema, que considera no sólo la teoría relevante sino también el conocimiento de expertos del sistema. El modelo presentado en este artículo se plantea como un instrumento para apoyar el pensamiento estratégico, las toma de decisiones y mejorar el aprendizaje organizacional de las entidades participantes de la toma de decisiones de un proceso minero aurífero.

Este artículo está dividido en 6 secciones. En la siguiente sección se describe la complejidad del sistema minero aurífero colombiano y su productividad. En la tercera sección se aborda el concepto de productividad, como componente principal de este problema. Posteriormente en la cuarta sección se muestra el proceso minero aurífero desde una visión sistémica del problema. En la quinta sección se desarrolla la validación del modelo. Finalmente en las dos últimas secciones se discuten los resultados de las simulaciones y se presentan las conclusiones obtenidas de esta investigación.

### Contexto de la productividad

La productividad está definida como la relación entre lo producido y los recursos consumidos para ello. El análisis de la productividad es útil para apoyar la toma de decisiones en la planeación estratégica, la administración de la producción,

el control de costos, la evaluación del desempeño y el análisis de la competitividad [9].

Las metodologías más utilizadas para construir modelos de medición de la productividad son: programación lineal, econometría y mediciones con números índices [9, 15].

La productividad puede ser parcial o multifactorial [18]. La productividad parcial estudia la relación entre la cantidad producida y la cantidad de insumo “i” utilizada. La productividad multifactorial explica la relación entre la cantidad producida y la sumatoria de todos los insumos utilizados para ello. La elección de una de las dos depende del objetivo de la medición y en varias ocasiones de la disponibilidad de los datos [18].

La productividad del capital y la productividad del trabajo son las medidas más comunes de la productividad parcial [15]. Estas miden el cambio en la capacidad productiva del proceso a partir de un cambio en el capital o en la fuerza laboral, respectivamente.

Tanto la productividad multifactorial como la productividad parcial del trabajo y del capital son consideradas en el modelo. Las productividades parciales dan una idea del desempeño del proceso de acuerdo con la utilización de cada uno de estos factores; pero no son comparables. Es por eso que también se mide la productividad multifactorial, ya que esta permite conocer cuál de ellos tiene más influencia en el proceso, de acuerdo con su evolución.

Para medir la productividad multifactorial se tomará como índice de salidas, los ingresos percibidos mensualmente por la operación minera. Mientras que los insumos serán la sumatoria del valor de la mano de obra ( $L_M$  and  $L_P$ ), más el capital de trabajo ( $K_M$  and  $K_P$ ) (ver Eq. 1).

$$Productividad = \frac{Ingresos\ por\ Operación}{F_K * (K_M + K_P) + F_L * (L_M + L_P)} \quad (Eq. 1)$$

## Modelo de dinámica de sistemas

Con el desarrollo de un modelo de simulación con DS, se enriquece el conjunto de modelos mentales y escritos existentes; en particular, con la incorporación de efectos dinámicos. El modelo representa la estructura compleja que determina la dinámica del sistema minero aurífero. La descripción del modelo conduce al entendimiento de sus ecuaciones, a la simulación como herramienta para comprender el comportamiento dinámico, a la formulación y evaluación de políticas, así como a la selección, adecuación educación de las mejores políticas para su implementación [31].

El principal objetivo de la modelación con DS es capturar y representar los procesos de retroalimentación, que junto a las estructuras de flujos y niveles, los retardos y las interacciones no lineales, determinan la dinámica del sistema [29]. Los diagramas causales son útiles para identificar los principales ciclos de retroalimentación del sistema y proporcionan una comprensión más intuitiva del comportamiento lógico de los sistemas y en especial la interacción de los diferentes factores y retardos del sistema [32]. El diagrama de la figura 1 muestra los ciclos de realimentación del ciclo productivo de un proceso minero aurífero, a partir de relaciones causales. Las flechas que unen dos variables indican la relación causal entre estas dos variables, mientras el signo al lado de la cabeza de la flecha indica la dirección del efecto que una variable tiene sobre la otra [29]. Así, una relación causal positiva de una variable  $x$  sobre una variable  $y$  y está representada por un signo “+” en la cabeza de la flecha; mientras un relación de efecto negativo, se representa con el signo “-”. Dependiendo del efecto, los ciclos de retroalimentación pueden ser de refuerzo (i.e. ciclo positivo) o de balance (i.e. ciclo negativo). Un ciclo de refuerzo implica que el efecto de una variable en el sistema tiende a reforzar o amplificar el comportamiento actual del sistema. Por ejemplo, entre mayor es la producción de oro, mayores serán los ingresos de la mina y la inversión para desarrollar más exploración de recursos y mejorar la capacidad

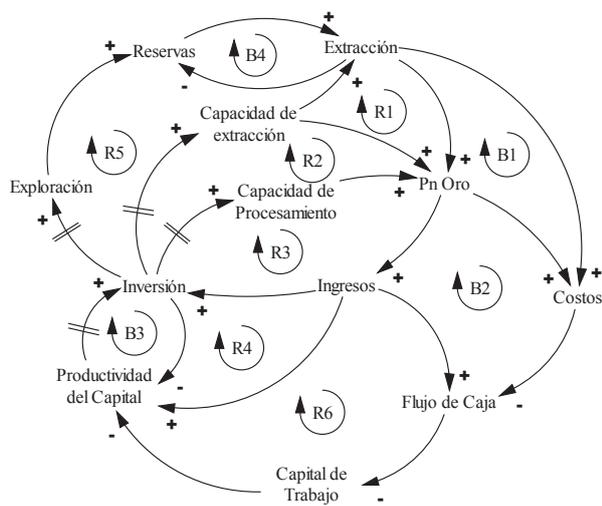
de procesamiento de mineral, lo cual se reflejara –después de un retardo– en un incremento de la producción. Un ciclo de balance implica que el efecto de una variable contrarresta o se opone al cambio. Por ejemplo, a mayor cantidad de reservas probadas de mineral, mayor es la extracción de dicho mineral y consecuentemente las reservas disminuirán.

Con los procesos de retroalimentación y las estructuras no lineales del sistema definidos en el diagrama causal, se pasa a construir el modelo formal por medio de la estructura de flujos y niveles que es la que permite simular el comportamiento del sistema. Los niveles son conocidos como variables de estado, y la tasa de cambio se determina en los flujos [29]. Para conocer más sobre DS se puede consultar [29] y [32].

El modelo de Dinámica de Sistemas propuesto se compone de 5 módulos: productivo, costos, financiero, productividad laboral, productividad del capital. Los datos de entrada son las variables macroeconómicas del entorno del sistema, la disponibilidad del recurso, los costos iniciales de producción y la proyección del precio del oro.

El primer módulo es el eje central del proceso minero, el cual incluye el proceso productivo minero que va desde la exploración hasta el beneficio del mineral. Se excluye la comercialización por tratarse de un mineral cuya demanda se considera garantizada [33].

La dinámica del ciclo productivo se presenta en la figura 1, donde se plantea la hipótesis dinámica que explica el comportamiento de los recursos y las reservas del depósito. Los primeros se van agotando a medida que las otras incrementan y posteriormente el crecimiento de las reservas es desacelerado por el proceso de extracción o por la pérdida de factibilidad. La capacidad de abastecimiento de un proceso minero está representada por la cantidad de reservas cuantificadas del recurso exploratorio. Sin embargo, la sola existencia de las reservas no garantiza la sostenibilidad de un proceso minero.



**Figura 1** Ciclo productivo

El ciclo productivo comienza con la generación de reservas a través de la exploración detallada del depósito (Eq. 2). Las reservas pueden ser obtenidas a partir de un resultado positivo en el análisis de factibilidad de un recurso indicado o medido [34]. Dada esta condición de factibilidad, en cualquier momento según las condiciones del mercado y el comportamiento de los costos de extracción y procesamiento, una reserva podría dejar de ser factible y convertirse de nuevo en un recurso ( $r_{nf}$ ). El nivel de reservas ( $r$ ) es el resultado de un ciclo dinámico entre los recursos medidos ( $R_{mf}$ ) y el volumen de extracción ( $E$ ). En el proceso minero las reservas son el resultado de la evolución de los recursos medidos, dependiendo del análisis de factibilidad ( $s$ ). Por tanto, un incremento de las reservas disminuye los recursos y recíprocamente entre mayor es el nivel de recursos medidos, por el concepto de economías a escala, mayor es la probabilidad de que estos puedan ser reservas.

$$r(t) = r(0) + s_{mf} * R_{mf} * dt - s_{nf} * r_{nf} * dt + E * dt \quad (\text{Eq.2})$$

de donde  $s_{mf}$  y  $s_{nf}$  son funciones que dependen, del precio del oro, la mineralogía del recurso y los costos del proceso y otros factores asociados a la infraestructura del proceso.

El volumen de extracción (Eq. 3) es determinado por la capacidad instalada de extracción ( $C_{ext}$ ), el inventario actual de reservas y la eficiencia de la fuerza laboral ( $Ef_{FLM}$ ) y la maquinaria ( $Ef_{mqM}$ ).

$$E = \begin{cases} r & \text{Si } r < C_{ext} * Ef_{FL} * Ef_{mq} \\ C_{ext} * Ef_{FLM} * Ef_{mqM} & \text{Si } r > C_{ext} * Ef_{FL} * Ef_{mq} \end{cases} \text{ Eq. (3)}$$

Las reservas y el volumen del material extraído forman un ciclo de realimentación de balance (B5) que describe el decrecimiento exponencial de las reservas a medida que van siendo extraídas. Sin embargo este decrecimiento se ve contrarrestado por el efecto de la exploración detallada que incrementa el nivel de reservas.

El material extraído es procesado para obtener la producción de oro, en función de la capacidad de procesamiento de la planta de beneficio. Esta producción es comercializada y generadora de ingresos. Los ingresos incrementan el flujo de caja y estimulan la inversión en el proceso. La inversión puede ser destinada a la exploración del depósito o a mejorar las capacidades de extracción y procesamiento del proceso. De esta manera se forman tres nuevos ciclos de realimentación positivos en el sistema (R1, R2 y R3). R1 es un ciclo de realimentación de refuerzo que contrarresta el efecto de decrecimiento exponencial causado por B3 en el nivel de reservas. Este ciclo explica porque las reservas no garantizan la continuidad de un proceso minero y una muestra de ello, se presenta en la minería artesanal y a pequeña escala. Este tipo de minería no posee los suficientes recursos económicos para invertir en exploración y está supeditada a la explotación de minas abandonadas o en su defecto a la invasión de minas en épocas de bonanza [35].

En la minería organizada, los ingresos motivan la inversión, ya que estos incrementan las tasas de retorno a la inversión y las utilidades. La inversión puede ser destinada a la exploración y/o a la adquisición de capacidad en los procesos de extracción y beneficio. R2 y R3 son dos ciclos

de refuerzo con retardo, que explican como en un sistema minero, las buenas políticas en el manejo de los ingresos pueden ser generadoras de más ingresos en el largo plazo, debido a la adquisición de capacidad. La inversión es incentivada también por el mejoramiento de la productividad del capital, el cual se puede dar por un incremento en los ingresos o una disminución en los niveles de inversión y de capital de trabajo, como lo muestra ciclo de refuerzo R4. Este ciclo muestra como la adquisición de capacidad, mejora la productividad del capital y esta a su vez incentiva la adquisición de más capacidad en el largo plazo para mantener el crecimiento sostenido del proceso.

En un sistema económico como el sistema minero aurífero, la producción y la productividad no crecen indefinidamente. En un proceso minero aurífero, los incrementos en la producción y en la productividad del capital causados por los ciclos de refuerzo R2, R3 y R4, son controlados o limitados por los costos de producción, la disponibilidad del capital de trabajo, y la capacidad del sistema para asimilar los volúmenes de mineral, como lo muestran los ciclos de balance B1 y B2. Los ciclos B1 y B2 muestran como un incremento en el volumen de extracción y de procesamiento debido al incremento en las capacidades, incrementan el volumen de costos del proceso, lo que a su vez disminuye su flujo de caja. En los periodos en los que se adquiere capacidad, la mayor parte de los ingresos son destinados a cubrir el retorno sobre la inversión, causando que el incremento en los costos sea cubierto por el capital de trabajo. De esta manera un incremento en el capital de trabajo tiene un efecto negativo sobre la productividad del capital, lo que desestimula la inversión en el largo plazo y controla la adquisición de capacidad.

El módulo financiero modela las inversiones para el desarrollo de un proceso minero, las cuales inicialmente se realizan a riesgo por un inversionista y que posteriormente si el proyecto es exitoso generará utilidades, que pueden ser reinvertidas de acuerdo a una política definida por el inversionista. El módulo financiero contempla

toda la estructura de inversiones, administración del capital y la generación de utilidades.

El tercer módulo representa la estructura de costos. En este se considera el impacto de los costos de mano de obra, materia prima y mantenimiento sobre las productividades parciales.

En el módulo de la productividad laboral esta toda la estructura de administración del personal. Este módulo recibe la información del módulo productivo para calcular la productividad laboral del sistema en base al volumen extraído y procesado y la fuerza laboral. En este, se analiza toda la estructura de la capacidad instalada en los procesos de extracción y beneficio y con la información suministrada por el módulo financiero determina la productividad del capital del proceso minero aurífero.

Por último, el comportamiento eficiente del proceso minero aurífero no solo depende de la forma en como son consumidos los recursos y como se distribuye la inversión, sino que también esta sujeta al comportamiento de factores externos como el ambiente, la sociedad y la economía. Todo lo anterior hace de este un modelo integral que contempla todas la conexiones entre los módulos y que se actualiza de acuerdo a los cambios en el entorno.

El entorno del sistema aurífero modelado incluye los cambios en el capital social, capital físico y el precio. El buen desempeño de un proceso minero aurífero depende en gran medida de las condiciones físicas y sociales de una región. El capital social define el conjunto de recursos sociales que conforman la estructura social de una comunidad para alcanzar el crecimiento económico y el bienestar de la misma y facilitar en su interior las acciones de los individuos [36]. Los recursos sociales en los que se encuentran el capital social están representados en: obligaciones y expectativas, información potencial, normas y sanciones efectivas, relaciones de autoridad, organización social apropiable y organización intencional [37]. El capital social es entonces modelado como la capacidad de un proceso minero para generar o destruir la confianza de la

comunidad hacia las actividades de cooperación impulsadas por las instituciones ligadas a tal proceso. En este sentido, la confianza de la comunidad en las actividades de cooperación incrementa el capital social de dicha comunidad. El éxito de las actividades de cooperación dependerá tanto de las políticas de las instituciones como de la confianza de la comunidad en el momento en que se ejecuten tales actividades [38]. Mientras más actividades exitosas se desarrollen en una comunidad, mayor será la confianza de ésta para futuras proyectos mineros.

Los activos físicos de la región son muy importantes para la población. Las carreteras y los medios de transporte son considerados parte del capital físico [38]. La transformación de capital físico de una región es una fuente generadora de confianza para la sociedad de dicha región [39]. La inversión en infraestructura vial de una región es un deber del Estado y un derecho de la sociedad por el pago de los impuestos. De ahí que la comunidad incremente su confianza en el Estado, cuando este último desarrolla actividades que le aportan al mejoramiento del capital físico. Es el Estado quien por mejorar la calidad de vida de la comunidad y atraer la inversión hacia estas regiones debe mantener una infraestructura vial en buen estado. Entre mayor es el número de kilómetros de vías construidas y pavimentadas, menor es el tiempo de acceso a las minas y a la región. Consecuente los costos de transporte de materias primas y el mineral explotado disminuirán.

De igual forma cuando el estado invierte en infraestructura la comunidad entiende esto como una actividad de cooperación, la cual posteriormente se ve reflejada en el estado de la confianza de la comunidad.

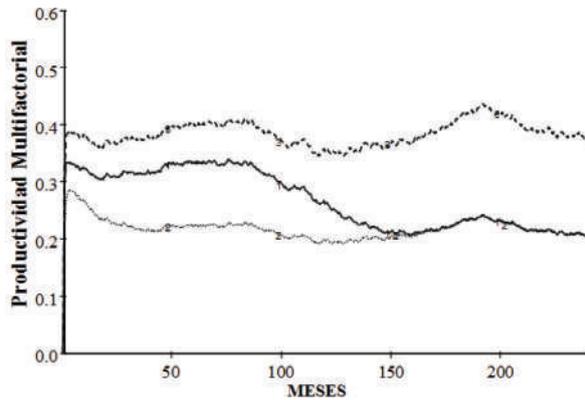
El precio es un factor exógeno y servirá para definir los escenarios de análisis, ya que el funcionamiento del sistema está sujeto a su comportamiento.

## Validación del modelo

El modelo fue sometido a una serie de pruebas de estructura y de comportamiento basadas en [40]. La validación de la estructura directa del modelo se realizó mediante la inspección directa de cada una de las ecuaciones y parámetros del modelo, verificando que no hubiese inconsistencia dimensional. Así mismo se verificó con otros modelos y autores que las ecuaciones que comprometen la estructura y el comportamiento del sistema si estén acorde con su estructura y no violan ninguna ley física de conservación [29, 41, 20].

El modelo fue sometido a un análisis de sensibilidad a las variables sociales (de entorno). Para este análisis se toma como base de comparación un sistema en el cual el estado, la sociedad y el sector privado desarrollan en promedio 6 actividades de cooperación para la creación de capital social. La figura 2 muestra los cambios en el indicador de la productividad multifactorial como respuesta a cambios en las actividades que generan el capital social de la comunidad. La línea continua (marcada con el #1) representa el caso base, mientras la línea punteada (marcada con el #2) y la línea discontinua (marcada con el #3) corresponden a una reducción del 50% y un incremento del 100%, respectivamente, de estas actividades con respecto al caso base. Para el caso en el que las actividades de capital social son incrementadas la figura 2 ilustra que el índice de productividad puede incrementar entre un 18% (al inicio de la simulación) y un 24% (en los periodos finales de la simulación). En el caso en que dichas actividades son reducidas, los cambios más notorios se ven al inicio de la simulación, cuando la productividad multifactorial alcanza a variar hasta un 30% en promedio. Ya al final de la simulación, la productividad alcanza valores similares a los del caso base. Este último comportamiento es debido a que después de varios periodos de explotación la comunidad considera que el nivel de cooperación del caso base es bajo comparado a las utilidades que están siendo generadas por la explotación minera dentro de su territorio.

Estos cambios son consistentes con la realidad, donde el sector aurífero normalmente es bastante vulnerable socialmente y esto se ve reflejado en la productividad.



**Figura 2** Productividad multifactorial como respuesta a los cambios en las condiciones iniciales de confianza

Bajo las consideraciones del escenario base, se requiere un poco más del 70% de confianza de la comunidad para mantener estable el indicador de productividad. Estos cambios son explicados por la no existencia de una política de inversión en capital social de acuerdo al desempeño del sistema. Estas consideraciones contemplan la iniciación por periodo de menos de una actividad de cooperación liderada por el estado y manteniendo esta política constante.

También se analizó la sensibilidad del modelo en cuanto a un cambio en los recursos indicados del depósito. Al multiplicar por 10 las toneladas de recursos indicados iniciales (se pasó de 100 millones a 1000 millones), el comportamiento de la productividad multifactorial no presenta cambios considerables.

Después de la validación del modelo, se concluyó que este es una abstracción de la estructura real de un proceso minero aurífero en Colombia, apropiada para la evaluación de políticas de mejoramiento que pueden ser implementadas en el modelo para analizar su impacto sobre el sistema.

## Resultados de Simulación

Los datos y la información utilizada para estas simulaciones fueron tomados de un informe de investigación que el Grupo GEMMA de la Universidad Nacional sede Medellín, presentó al Departamento de Antioquia en 2007 [42]. Estos datos corresponden a la Mina El Cogote, en la localidad de Segovia, Antioquia. El horizonte de simulación es de 20 años, con un paso de simulación mensual. La tabla 1 contiene las condiciones iniciales bajo las cuales se simula el modelo.

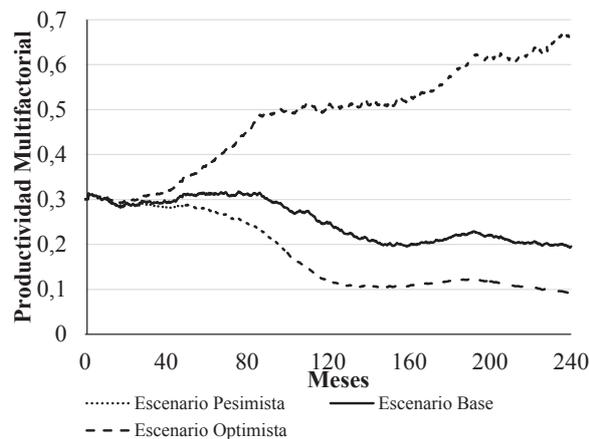
**Tabla 1** Condiciones iniciales del modelo

| <i>Variable</i>                          | <i>Pequeña y mediana minería</i> |
|--|----------------------------------|
| Recursos Indicados                       | 10,000,000 ton                   |
| Recursos medidos                         | 100,000 ton                      |
| Reservas probadas                        | 100,000 ton                      |
| Fuerza Laboral Mina                      | 100 hombres                      |
| Fuerza Laboral Planta                    | 20 hombres                       |
| Inversión en exploración inicial         | USD 5,000,000                    |
| Inversión en Capacidad de Mina Inicial   | USD 1,260,000                    |
| Inversión en Capacidad de Planta Inicial | USD 2,100,000                    |
| Capacidad de Extracción Inicial          | 5,000 ton                        |
| Capacidad de Procesamiento Inicial       | 4,200 ton                        |
| Costos fijos                             | USD 20,000                       |

Los escenarios analizados fueron construidos con base a las tendencias del precio y los cambios en los factores de capital social e infraestructura física de la región. Con este análisis se quiere conocer la respuesta del sistema a los cambios del entorno. La variable de interés a analizar es la productividad multifactorial. Se analizan tres escenarios, cada uno con diferentes características de acuerdo a cada factor. El primer escenario analiza las respuestas del sistema bajo condiciones promedio: El precio oscila alrededor de un promedio con cierto grado de volatilidad, basado en la volatilidad histórica. 6 actividades de cooperación y creadoras de capital social

por año son consideradas. La infraestructura contempla el 60% de las vías en buen estado y tasas de construcción y reparación de 2 y 4 km/mes. El segundo es un escenario pesimista que contempla un precio volátil con tendencia decreciente, 3 actividades de cooperación por año, y una infraestructura vial pésima, con el 20% de las vías en buen estado y tasas de construcción y reparación de 1/2 y 1 km, respectivamente. Por último, se analiza un escenario optimista, el cual considera un precio volátil con tendencia creciente, 1 actividad de cooperación mensual y una infraestructura vial en buen estado, con el 80% de las vías en buen estado y tasas de construcción y reparación de 4 y 8 km por mes, respectivamente.

Los resultados de la simulación del índice de productividad multifactorial para los tres escenarios se muestran en la figura 3. En términos generales se aprecia que los tres factores (capital social, precio y capital físico) considerados en los escenarios tienen un gran impacto en la productividad y el desempeño de un sistema minero aurífero. En el escenario base (Línea continua), la volatilidad del precio y la confianza retardan la generación de utilidades y hacen largo el proceso de recuperación de la inversión, por lo cual las inversiones en el proceso no son incentivadas y la productividad y el desempeño del proceso decaen al final de la simulación.



**Figura 3** Evolución del indicador de productividad multifactorial

En el escenario pesimista (Línea punteada), la productividad decrece sustancialmente durante la vida útil del depósito. Algunas reservas continúan siendo factibles de explotar y su explotación es cargada al costo de capital, lo que hace que los niveles de productividad se desplomen posteriormente y el sistema termine endeudado con el capital de trabajo.

Finalmente, el escenario optimista (Línea discontinua) muestra el comportamiento idóneo del sistema. Este comportamiento es el resultado de una buena planeación, aprovechamiento de las oportunidades que el mercado brinda y la cooperación del sector con la sociedad, es decir, la generación de capital social. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el precio del oro no siempre tiene un comportamiento creciente, como el analizado en este artículo y que la confianza de la comunidad no siempre se va a mantener en estos niveles, sino es incentivada.

## Conclusiones

Este trabajo presenta un modelo en DS que estudia la estructura del sistema minero aurífero y su interacción con el ambiente en Colombia. En particular, se estudian políticas para el mejoramiento de la productividad en dicho sector. El modelo caracteriza el sistema minero aurífero en una forma alterna a la tradicional, con una visión holística y sistémica del sistema. El desarrollo y análisis del modelo permitió la caracterización de la problemática asociada y la evaluación de políticas para el mejoramiento de la productividad. En este trabajo se muestra una nueva forma de medir la productividad de sistemas caracterizados por las relaciones no lineales, estructuras de realimentación y efectos retardados.

Simulaciones del sistema muestran el efecto de diferentes escenarios en la productividad del proceso. El análisis de escenarios permite concluir que para garantizar la sostenibilidad productiva de un sistema minero aurífero, se requiere mantener políticas de inversión sostenida, de manera que se presente un incremento constante de los

volúmenes de producción y garantizar un nivel de reservas para periodos de crisis o inestables del mercado.

Los resultados del modelo son consistentes con los resultados de [20] en el análisis del crecimiento de la productividad del sector minero aurífero del Canadá, en dónde se muestra la influencia del precio del oro en la minería de este sector. Las simulaciones permiten concluir que grandes cambios positivos en las actividades generadoras de capital social tienen un impacto positivo sobre la productividad multifactorial del proceso minero aurífero colombiano. La confianza inicial de una comunidad y las acciones de cooperación que realicen el estado y la inversión privada en el transcurso de la vida de un proyecto van a determinar el éxito del mismo. Esta sensibilidad es consistente con la realidad, donde el sector aurífero normalmente es bastante vulnerable socialmente y esto se ve reflejado en la productividad.

Como trabajo futuro se propone profundizar más allá en la modelación de los 5 capitales y su influencia sobre la productividad y la competitividad de la minería de una región. Por último se propone ampliar el alcance del modelo para medir la productividad del sector minero aurífero en Colombia y aplicarlo a otros tipos de minería.

## Referencias

1. DANE. *Informe de Coyuntura Económica Regional Departamento de La Guajira*. Bogotá, Colombia. Ed. Banco de la República. Disponible en: [http://www.dane.gov.co/files/icer/2006/an06/guajira\\_iceran06.pdf](http://www.dane.gov.co/files/icer/2006/an06/guajira_iceran06.pdf). Consultado: Junio 9, 2008.
2. UPME. *Plan nacional para el desarrollo minero visión al año 2019*. Disponible en: [http://www.upme.gov.co/Docs/PNDM\\_2019\\_Final.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/PNDM_2019_Final.pdf). Consultado: Septiembre 13, 2013.
3. O. García, M. Molina. “Avances en la Solución de Impactos ambientales Causados por la Minería Aurífera del Nordeste Antioqueño”, E. Berrezueta Alvarado, M. J. Domínguez-Cuesta (editores). *Técnicas Aplicadas a la Caracterización y Aprovechamiento de Recursos Geológico-Mineros: Procesos Experimentales* (Vol. II). Ed. Instituto Geológico y Minero de España. Oviedo, España. 2011. pp. 40-50.
4. Mesa Sectorial De Minería. *Caracterización ocupacional del sector minero*. Servicio Nacional de Aprendizaje-SENA. Bogotá D.C, Colombia. 2003. pp. 1-162. Disponible en: <http://observatorio.sena.edu.co/mesas/01/MINERIA.pdf>. Consultado: Septiembre 13, 2013.
5. DANE. *Producto Interno Bruto - Primer trimestre*. Disponible en: [http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib/cp\\_PIB\\_ltrim13.pdf](http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib/cp_PIB_ltrim13.pdf). Consultado: Septiembre 13, 2013.
6. J. Cock, W. López. “Conflicto y Colaboración en la Minería de Oro en Segovia y Remedios”. R. Buitelaar (editor). *Aglomeraciones Mineras y Desarrollo Local en América Latina*. Ed. CEPAL en copublicación con Alfaomega S.A. Bogotá, Colombia. 2001. pp. 273-297.
7. PBI Colombia. “El “boom” minero-energético”. *Colombia Boletín Informativo*. Vol 18. 2011. pp. 4-7. Disponible en: [http://www.pbi-colombia.org/fileadmin/user\\_files/projects/colombia/files/colomPBla/111122\\_boletin\\_final\\_web.pdf](http://www.pbi-colombia.org/fileadmin/user_files/projects/colombia/files/colomPBla/111122_boletin_final_web.pdf). Consultado: Septiembre 9, 2013.
8. S. Spiegel. “Resource policies and small-scale gold mining in Zimbabwe”. *Resources Policy*. Vol. 34. 2009. pp. 39-44.
9. E. Sudit. “Productivity Measurement in industrial operations”. *European Journal of Operational Research*. Vol. 85. 1995. pp. 435-453.
10. R. Solow. “Technical Change and the Aggregate Production Function”. *The Review of Economics and Statistics*. Vol. 39. 1957. pp. 312-320.
11. B. Gold. “Productivity Analysis and System Coherence”. *Operational Research Society*. Vol. 16. 1965. pp. 287-307.
12. D. Caves, L. Christensen, W. Diewert. “The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input, Output, and Productivity”. *Econometrica*. Vol. 50. 1982. pp. 1393-1414.
13. W. Diewert, C. Morrison. “Adjusting Output and Productivity Indexes for Changes in the Terms of Trade”. *The Economic Journal*. Vol. 96. 1986. pp. 659-679.
14. W. Diewert. “Fisher Ideal Output, Input, and Productivity Indices Revisited”. *The Journal of Productivity Analysis*. Vol. 3. 1992. pp. 211-248.

15. H. Singh, J. Motwani, A. Kumar. "A Review and Analysis of the State of the Art Research on Productivity Measurement". *Industrial Management & Data Systems*. Vol. 100. 2000. pp. 234-241.
16. R. Mahadevan. "To Measure or Not To Measure Total Factor Productivity Growth?". *Oxford Development Studies*. Vol. 31. 2003. pp. 365-378.
17. J. Wacker, C. Yang, C. Sheu. "Productivity of production labor, non-production labor, and capital: An international study". *Int. J. Prod. Eco.* Vol. 103. 2006. pp. 863-872.
18. ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). "Measuring of Productivity, Manual: Measurement of Aggregate and Industry-Level Productivity Growth". Disponible en: <http://www.oecd.org/dataoecd/59/29/2352458.pdf>. Consultado: Febrero 10, 2006.
19. B. Shebeb. "Productivity Growth and Capacity Utilization in the Australian Gold Mining Industry: a Short-Run Cost Analysis". *Economic Issues*. Vol. 7. 2002. pp. 1-11.
20. J. Smith. *Productivity Trends In The Gold Mining Industry in Canada, CSLS Research Report 2004-08*. Ottawa, Canada. Centre for the Study of Living Standards, 2004. Disponible en: <http://www.csls.ca/reports/csls2004-08.pdf>. Consultado: Septiembre 13, 2013.
21. J. Tilton, H. Landsberg. "Innovation, productivity growth, and the survival of the U.S. copper industry". *Resources for the Future*. Discussion Paper 97-41. 1997. Disponible en: <http://www.rff.org/Documents/RFF-DP-97-41.pdf>. Consultado: Septiembre 13, 2013.
22. M. Kuby, Z. Xie. "The Effect of Restructuring in US Coal Mining Labor Productivity 1980-1995". *Energy*. Vol. 26. 2001. pp. 1015-1030.
23. P. Garcia, P. Knights, J. Tilton. "Labor productivity and comparative advantage in mining: The Copper industry in Chile". *Resources Policy*. Vol. 27. 2001. pp. 97-105.
24. J. Tilton. "Labor productivity, costs, and mine survival during a recession". *Resources Policy*. Vol. 27. 2001. pp. 107-117.
25. M. Kulshreshtha, J. Parikh. "A Study of Productivity in the Indian Coal Sector". *Energy Policy*. Vol. 29. 2001. pp. 701-713.
26. M. Kulshreshtha, J. Parikh. "Study of Efficiency and Productivity Growth in Opencast and Underground Coal Mining in India: a DEA Analysis". *Energy Economics*. Vol. 24. 2002. pp. 439-453.
27. M. Aljuhani. "Labour's utilization and labours' productivity of a gold mine in Saudi Arabia". *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. Vol. 102. 2002. pp. 307-309.
28. J. Sterman. "A Skeptic's Guide to Computer Models". G. O. Barney, W. B. Kreutzer, M. J. Garrett (editores). *Managing a Nation: the Microcomputer Software Catalog*, Boulder, Colorado. 1991. pp. 209-229.
29. J. Sterman. "Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World". 1<sup>st</sup> ed. Ed. McGraw-Hill. Boston, MA. 2000. pp. 1-982.
30. P. Senge, J. Sterman. "Systems thinking and organizational learning: Acting locally and thinking globally in the organization of the future". *European Journal of Operational Research*. Vol 59. 1992. pp. 137-150.
31. J. Forrester. "System dynamics, system thinking, and soft OR". *System Dynamics Review*. Vol. 10. pp. 245-256.
32. J. Morecroft. "Strategic Modelling and Business Dynamics: A Feedback Systems Approach". 1<sup>st</sup> ed. Ed. John Wiley & Sons. Chichester, UK. 2007. pp. 1-430.
33. A. Ruiz. "Situación y tendencias de la minería aurífera y del mercado internacional del oro". *Serie Recursos Naturales e Infraestructura*. 1<sup>st</sup> ed. Ed. Naciones Unidas. Santiago de Chile. 2004. pp.1-85. Disponible en: <http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/1/15391/lcl2135e.pdf>. Consultado: Abril 20, 2007.
34. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and petroleum (CIM). *CIM Definition Standards – for Mineral Resources and Mineral Reserves*. 2010. Disponible en: [http://web.cim.org/UserFiles/File/CIM\\_DEFINITON\\_STANDARDS\\_Nov\\_2010.pdf](http://web.cim.org/UserFiles/File/CIM_DEFINITON_STANDARDS_Nov_2010.pdf). Consultado: Septiembre 17, 2013.
35. International Institute for Environment and Development (IIED). *Abriendo Brecha. Minería, Minerales y Desarrollo Sustentable*. Ed. Earthscan Publications Ltd. United Kindom, UK. 2002. Disponible: <http://pubs.iied.org/pdfs/9287IIED.pdf>. Consultado: Septiembre 17, 2013.
36. R. Dudley. *The dynamic structure of social capital how interpersonal connections create communitywide benefits*. Web Proceedings of the 22nd International conference of system dynamics society. Oxford, UK. 2004. Disponible en: [http://www.systemdynamics.org/conferences/2004/SDS\\_2004/PAPERS/117DUDLE.pdf](http://www.systemdynamics.org/conferences/2004/SDS_2004/PAPERS/117DUDLE.pdf). Consultado: Noviembre 20, 2008.

37. R. Millan, S. Gordon. "Capital social: una lectura de tres perspectivas clásicas". *Revista Mexicana de Sociología*. Vol. 66. 2004. pp. 711-747.
38. J. Bury. "Livelihoods in transition: transnational gold mining operations and local change in Cajamarca, Peru". *The Geographical Journal*. Vol. 170. 2004. pp. 78-91.
39. A. Bebbington. "Capitals and capabilities: a framework for analyzing peasant viability, rural livelihoods and poverty". *World Development*. Vol. 27. 1999. pp. 2021-2044.
40. J. Barlas. "Formal aspects of model validity and validation in system dynamics". *System Dynamics Review*. Vol. 12. 1996. pp. 183-210.
41. B. O'Regan, R. Moles. "Modelling policies and decisions: A case study in mineral extraction". *Information & Management*. Vol. 40. 2003. pp. 147-157.
42. Grupo de Estudios en Georrecursos, Minería y Medio Ambiente – GEMMA. *Implementación de Mejores Prácticas para el Mejoramiento de la Productividad de la Minería Aurífera del Nordeste Antioqueño*. Secretaría de Productividad, Gobernación de Antioquia. Medellín, Colombia. 2007. pp. 1-200