

DEPOSITOS SUPERGENOS DE ORO

Halina Lachowicz (1)

(1) Departamento de Geología, Escuela Politécnica Nacional, halina.lachowicz@epn.edu.ec

RESUMEN

Los depósitos supérgenos de oro, tanto lateríticos como saprolíticos, en las últimas décadas son objeto de intensa prospección y exploración en zonas tropicales, subtropicales, templadas, húmedas y áridas. La ventaja de estos yacimientos es la aparición bajo pequeña sobrecarga, como material blando, lo que permite la explotación a cielo abierto, sin uso de explosivos y sin la posterior molienda. El oro en estos yacimientos aparece en forma nativa, bastante pura, lo que facilita su recuperación. Por estas razones los yacimientos supérgenos de Au son económicamente rentables, inclusive con leyes bajas de Au.

Los depósitos supérgenos de oro se desarrollaron en las zonas de oxidación de los yacimientos de oro, como resultado de procesos que implican la migración de oro y por remoción de la ganga soluble y los sulfuros. Los resultados de las investigaciones indican que las condiciones más favorables para el enriquecimiento secundario de oro hay en los ambientes débilmente ácidos, neutros y débilmente alcalinos. Las plantas, los ácidos orgánicos por ellas producidos (ácidos húmico y fúlvico, aminoácidos y ácidos carboxílicos), la materia orgánica, arcillas, minerales de Fe y Mn, microorganismos (principalmente bacterias y arqueas) están involucrados en el proceso de formación de los depósitos supérgenos del oro, es decir en la disolución, dispersión y re-concentración como oro secundario en las condiciones de subsuelo.

Palabras claves: oro supérgeno, mineralización secundaria, depósitos lateríticos, depósitos saprolíticos, solubilidad de oro, movilización de oro.

ABSTRACT

The prospection and exploration of supergene gold deposits, lateritic and saprolitic, in the warm to tropical regions and in humid to semi-arid climates, in the last decades is very intense. The advantage of these deposits is the appearance near the surface, as soft material, which allows open-pit mining, without the use of explosives and without the subsequent grinding. The gold in these deposits is present in native form, quite pure, which facilitates its recovery. For these reasons the supergene deposits of Au are economically profitable, even with very low Au content.

Supergene gold deposits developed in areas of oxidation of the gold deposits, as a result of processes that involve the migration of gold and by removal of the soluble wall rocks and sulphides. The results of the research indicate that the most favorable conditions for the secondary enrichment of gold are in the environments weakly acidic, neutral and weakly alkaline. Plants, organic acids by them produced (humic and fulvic acids, amino acids and carboxylic acids), organic matter, clays, minerals of Fe and Mn, microorganisms (bacteria and archaea) are involved in the process of formation of the supergene gold deposits, i.e. in the dissolution, dispersion, and re-concentration as secondary gold in the conditions of subsoil.

Keywords: supergene gold, secondary mineralization, lateritic deposits, saprolitic deposits, gold solubility, gold migration.

INTRODUCCION

En las últimas décadas el oro ha sido buscado en los países del tercer mundo, los cuales están localizados en su mayoría en los trópicos, donde existen extensos terrenos lateríticos. El boom del oro en los años 1980, comenzó en 1978, debido a una combinación de altos precios del oro (más de \$ 400 USD la onza), la capacidad técnica del beneficio minero de las menas de bajos contenidos cercanas a la superficie y el descubrimiento de enormes yacimientos en perfiles de meteorización lateríticos en todo el mundo, especialmente en Australia (Wilson, 1983; Wilson, 1984; Mann, 1984; Davy & El-Ansary, 1986). La posterior intensa prospección de oro en los países subdesarrollados se concentró principalmente en los terrenos tropicales (Lima da Costa, 1993).

Los procesos supérgenos modifican significativamente la mineralogía de los

cuerpos mineralizados. En los yacimientos hidrotermales de oro no se desarrollan grandes zonas de enriquecimiento secundario debajo del nivel freático, como ocurre en los depósitos de sulfuros, pero se desarrollan las zonas de enriquecimiento secundario o supérgeno. Los depósitos supérgenos son generalmente de baja ley, pero de gran tonelaje, y son apropiados para la explotación a cielo abierto a gran escala.

La aparición de oro con contenidos económicos en los depósitos supérgenos, ha surgido como uno de los más recientes retos en la metalogenia. El oro ha sido reportado en polvo, granos gruesos e inclusive en grandes pepitas en un ambiente de meteorización supérgena (Michel, 1987). Experimentos y teorías concernientes a la formación de oro secundario han aportado datos sobre la naturaleza de aparición de este metal en perfiles de meteorización naturales (Mann, 1984).

En muchos países la presencia de oro industrial en la zona de oxidación de los depósitos de oro y la existencia de tecnología adecuada para su aprovechamiento, estimuló la prospección y exploración de oro de este tipo. Los depósitos supérgenos de oro en ambientes lateríticos han sido estudiados primero en los años 80-ta en Australia y África Occidental. Luego varias ocurrencias importantes de Au supérgeno fueron descubiertas en los años 90-ta en la región amazónica, dando gran impulso a la exploración mineral en el Norte de Brasil.

GENERALIDADES

Los depósitos de oro expuestos a oxidación pueden llegar a enriquecerse cerca de superficie, cuando la ganga soluble y los sulfuros son removidos y el oro es sometido a los procesos de migración.

El creciente conocimiento de paleoclimas y cambios climáticos globales ha permitido identificar las principales etapas de desarrollo de la mineralización secundaria. Esto fue especialmente útil en la comprensión de la formación de los yacimientos supérgenos lateríticos de Au, tanto en condiciones tropicales, como subtropicales y templadas, desde zonas húmedas hasta áridas. (Freyssinet, 1993, Colin *et al*, 1997).

Los depósitos supérgenos se encuentran en lomas bajas o terrenos planos, en los cuales se desarrollaron los perfiles lateríticos sobre el bedrock. La ocurrencia de oro supérgeno es difícil de predecir, porque ella está controlada por una combinación compleja de procesos.

El oro está generalmente presente por encima del cuerpo meteorizado, donde es concentrado y depositado por ciertas soluciones que viajan a través de la zona meteorizada. El oro secundario aparece en la laterita superficial y más profunda saprolita y consiste en granos cristalinos dispersos. Químicamente alterados y físicamente transportados los granos primarios y pepitas, derivados del cuerpo original mineralizado, ocurren en la superficie y cerca de la superficie en los depósitos secundarios. Estos son los principales objetivos para los operadores de los detectores de metales. Pero se debe tomar en cuenta que el bedrock meteorizado también está a menudo cubierto por una gruesa secuencia de sobrecarga (arenas, aluvios y coluvios) y este material debe ser evitado porque fue mezclado. También se debe tener cuidado de los perfiles lateríticos desarrollados sobre aluvio y coluvio y no sobre bedrock.

La movilidad, migración y concentración o dispersión del oro durante la oxidación de los depósitos auríferos es fuertemente influenciada por los siguientes factores:

- Tipo de depósito y su composición mineralógica, la naturaleza de la ganga, tipos de minerales primarios que contienen oro.
- Tipo de roca caja, su composición mineralógica y química.
- Grado de fracturación del depósito y la roca caja.
- Factores climáticos
- Posición del nivel freático
- Agentes orgánicos.

El Au nativo es el único mineral supérgeno de oro. La composición química del oro nativo secundario puede ser muy variable. Por ejemplo, no solamente plata y cobre pueden estar presentes, pero también en algunos ambientes de meteorización el hierro es un componente traza en las aleaciones de oro. En el yacimiento Coolgardie en Australia las pepas de oro encierran concreciones pisolíticas de laterita rica en Fe, de bauxita u otros detritos del suelo. En algunas pepas se encontraron inclusiones ovaladas de hematita, parcialmente hidratada, cerca de los bordes de las pepas (Wilson, 1983). Sin embargo en perfiles lateríticos la pureza del oro es generalmente más alta que en los yacimientos primarios, lo que es causado por la eliminación de Ag y otros elementos unidos al Au durante los procesos supérgenos (Wilson, 1983).

El oro supérgeno es frecuentemente encontrado en asociación con haluros de plata, clorargirita, bromargirita y iodargirita, sugiriendo que estos dos metales preciosos fueron transportados como cloruros, bromuros o yoduros en las aguas supérgenas.

El oro nativo es relativamente inerte y en muchos depósitos, especialmente los de sulfuros y sulfosales, el mineral pasa a la zona de oxidación en la misma forma como está presente en la zona primaria, pero en ciertas condiciones puede disolverse (formando complejos iónicos) y migrar. La solubilidad del oro es mucho más grande cuando se libera en forma iónica de las redes cristalinas de la pirita, arsenopirita o cuando el oro es liberado

en forma submicroscópica (coloidal) de estos minerales huéspedes. El oro puede darse en forma soluble o como oro finamente separado, esponjoso y como metal finamente dividido llamado mostaza de oro. Cuando el oro está presente en partículas mayores a 100 μm de diámetro, su solubilidad es muy restringida. La mayor parte de oro migra en forma física como laminas, lentejuelas y pequeñas pepitas. El oro en esta forma también tiende a restringir la migración de oro iónico. Según algunos científicos el tamaño de oro determina su comportamiento en la zona de oxidación.

El oro liberado por la oxidación de sulfuros es incorporado en minerales y compuestos amorfos que cementan los gossans, donde el Au microscópico y submicroscópico está íntimamente mezclado con limonita, wad (óxidos de Mn) y otros agregados. Un poco de este oro también encuentra su camino al eluvio y por último a los placeres aluviales. El oro muy fino (harina de oro) puede mantener considerable movilidad en el agua y ser movido aguas abajo en el sistema de drenaje a grandes distancias. En zonas de oxidación esponjosas y sueltas, el oro fino puede moverse físicamente hacia abajo por gravedad o ser movido por aguas percolantes. Según las condiciones, el oro puede migrar en diferentes formas químicas. No se conoce exactamente las formas de oro en las aguas oxidantes de los depósitos de oro, pero ciertas posibles formas pueden ser inferidas basándose en el quimismo de las aguas subterráneas y aguas de minas.

DEPOSITOS LATERITICOS Y SAPROLITICOS

Los depósitos lateríticos y saprolíticos de Au pueden estar presentes en el mismo perfil (Fig.1), algunas veces separados por una zona estéril, con bajo contenido de Au.

El perfil laterítico maduro en la mayoría de los casos comprende:

- Residuo laterítico (grava ferruginosa pisolítica y corteza dura de pocos milímetros o centímetros) – 2-8 m;

- están presentes: goethita, hematita, cuarzo, caolinita, gibbsita
- Zona arcillosa moteada – 0-10 m; están presentes: goethita, hematita, cuarzo, caolinita
- Arcillas: 0-10 m; están presentes: goethita, cuarzo, caolinita
- Saprolita ferruginosa: 0-10 m; están presentes: goethita, cuarzo, caolinita
- Saprolita: 20->50 m; están presentes: goethita, cuarzo, caolinita y relictos de minerales primarios

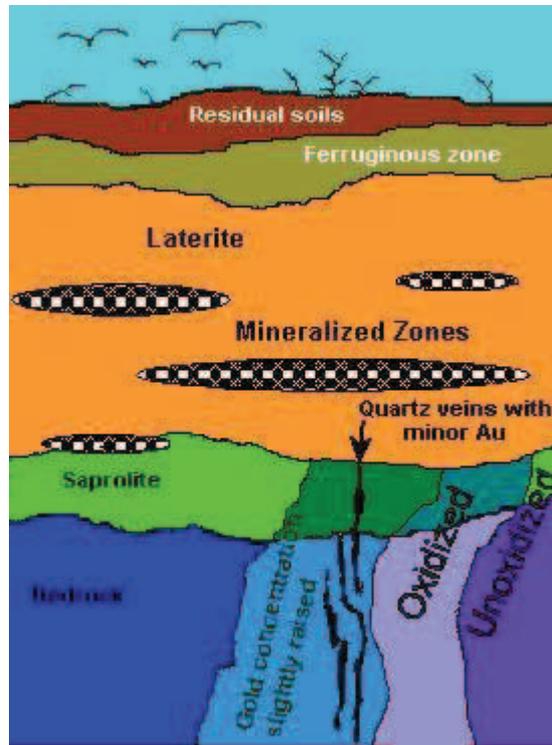


Figura 1: Perfil laterítico con Au diseminado en laterita y saprolita que se desarrollaron en las condiciones de meteorización tropical sobre una amplia gama de rocas de bedrock, pero lejos de depósitos conocidos de oro en bedrock.

- Saprolita: 20->50 m; están presentes: goethita, cuarzo, caolinita y relictos de minerales primarios
- Saprock: 0-20 m; relictos de minerales primarios, caolinita, cuarzo y esmectita.

En los perfiles lateríticos la conducta del oro es controlada por reacciones de oxidación-reducción a la escala del perfil, debido a la presencia de varias zonas donde el pH, Eh y la concentración de diferentes elementos estimula el movimiento diferenciado del oro. La concentración de oro supérgeno puede darse en diferentes zonas, por ejemplo en la zona de la sabana en Mali la mayor acumulación del oro secundario fue encontrada en la zona moteada, mientras que en el bosque lluvioso de la Guyana Francesa, el oro secundario fue acumulado principalmente en la capa superior del suelo (Freyssinet, 1994).

Las lateritas formadas durante el Terciario y recientemente en un clima tropical, en las zonas cubiertas por densos bosques lluviosos, tales como la región amazónica o África Occidental, actualmente sufren fuerte meteorización y erosión que recortan los perfiles lateríticos. En consecuencia los gruesos suelos que se forman actualmente, cubren en diferentes lugares diferentes partes de los perfiles recortados. Las muestras de suelos tomadas debajo de la superficie, pueden en realidad no empezar al tope de lateritas, sino en cualquier lugar a lo largo del perfil. La distribución del oro en las lateritas no recortadas tiende a ser sigmoidal. Se

pueden diferenciar las dos convexidades (el contenido más alto): una en las crestas del hierro superficiales y otra en la base de las saprolitas. La curva sigmoidal puede ser cortada, fuertemente modificada u oculta por la meteorización tropical. La intensa meteorización puede disminuir la concentración p.ej. los elementos pueden ser dispersos (Lima da Costa, 1993).

Depósitos saprolíticos de oro

Los depósitos saprolíticos están limitados a la fuente primaria meteorizada o lateralmente dispersos en la roca caja meteorizada, como una o más zonas subhorizontales, en o debajo del nivel de agua; 10-70 m de profundidad. Unas extensas zonas de enriquecimiento supérgeno en saprolitas (y dentro y debajo de los sedimentos de paleodrenaje) se forman generalmente en los ejes de drenajes salinos. La matriz es generalmente rica en arcillas y las aguas subterráneas son altamente salinas. El oro fue movilizado como haluros (Cl, I), complejos en ambientes altamente oxidantes ($Eh > 550$ mV) y ácidos ($pH < 4.5$) - Butt (1998). Estudios realizados han demostrado que el oro generalmente es secundario y de gran pureza; se encuentra en las saprolitas en la fracción de alrededor de 75 y 62 μm (Lima da Costa, *et al.*, 1993). En profundidad pueden ser más abundantes los granos primarios residuales. El oro secundario aparece como granos irregulares, octaedros, dodecaedros y láminas hexagonales o triangulares.

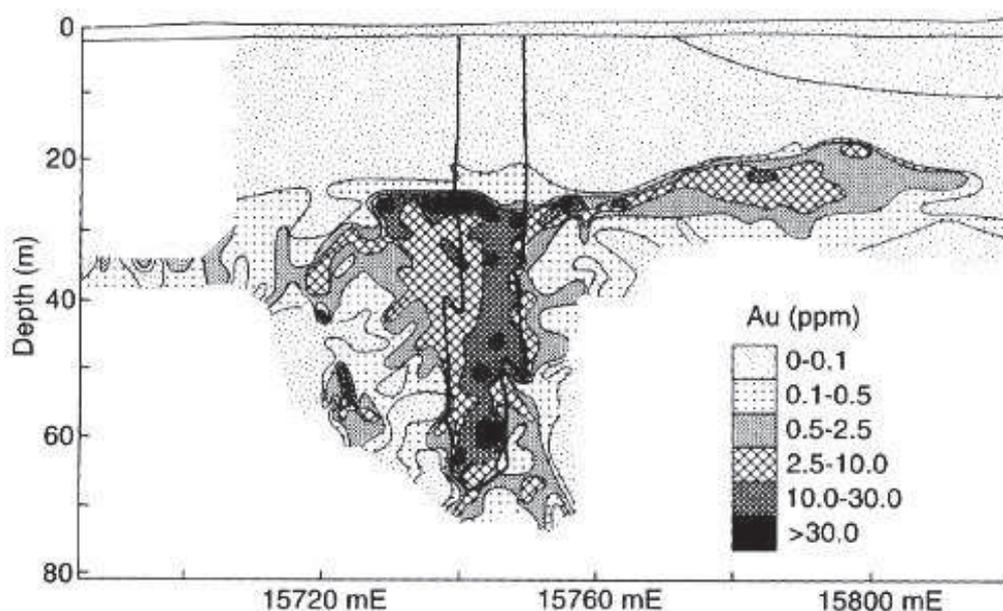


Figure 2. Saprolitic gold deposit, Hannan South, Western Australia (after Lawrance 1992).

Las saprolitas pueden alcanzar a decenas de metros de potencia, de modo que en sectores tropicales se originan cuerpos auríferos residuales supérgenos que pueden tener gran relevancia económica (Fig.2). La saprolita es un material superficial blando que es explotable a cielo abierto, no requiere de gastos de molienda, el oro contenido en ella está libre, facilitando procesos metalúrgicos. Por lo tanto las saprolitas pueden explotarse económicamente, inclusive con leyes bajas de Au. Por ejemplo en Guyana, en la mina Omai se explota los saprolitas con la ley de corte 0.4 g/t de Au.

Depósitos lateríticos de oro

Actualmente son conocidos de los bosques lluviosos, sabana, zonas semiáridas, pero de condiciones húmedas al lo menos por temporadas, tropicales y subtropicales y de relieve moderado. Los yacimientos lateríticos de oro se forman cuando las rocas que contienen oro, hasta si contienen solamente las trazas de oro, son sometidas a la meteorización laterítica. En tales circunstancias el oro puede ser secundariamente enriquecido a pepitas cerca de la base de la laterita (Fig.3).

Los depósitos lateríticos están contiguos con zonas ferruginosas y moteadas del perfil laterítico, predominantemente en la superficie o enterrados bajo una capa poco potente de sedimentos (<20 m). Estos depósitos tienen potencia 2-10 m y se caracterizan por oro

finogranular y un poco de oro primario residual. Algunas veces también está presente el oro grueso como pepitas e inclusiones dentro de vetas de cuarzo y como cristales euhedrales secundarios desarrollados con los óxidos de Fe.

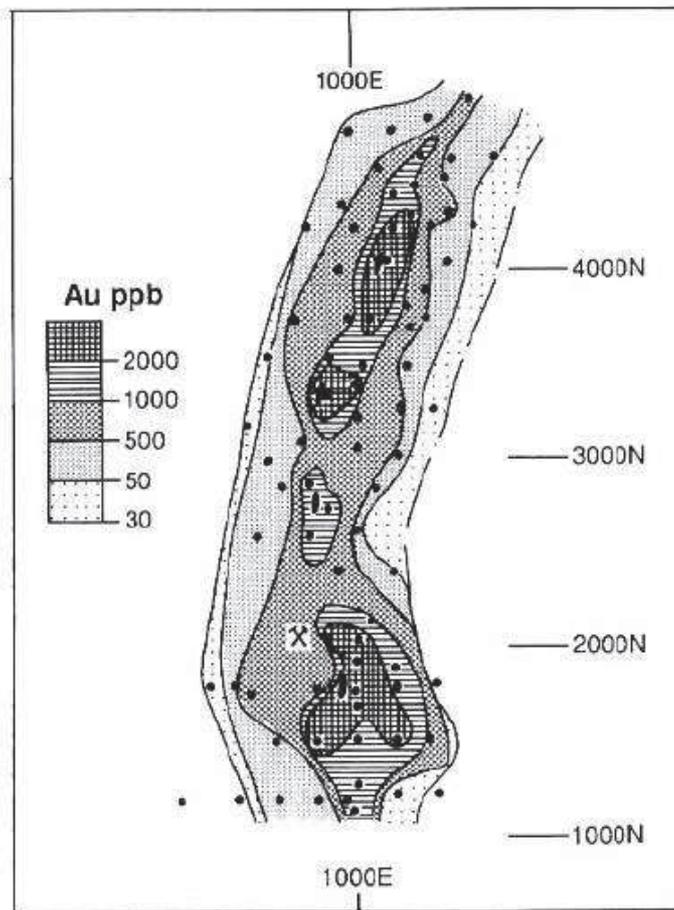


Figure 3. Gold distribution in lateritic residuum, Mt Gibson, Western Australia (Smith & Anand 1992).

De las fuentes primarias, el oro puede ser movilizado y transportado a través de la roca meteorizada por la acción de las aguas subterráneas. En este proceso el oro pasa a la

solución junto con el hierro, en el ambiente de reducción y es nuevamente precipitado en la tabla de agua en el ambiente de oxidación. La precipitación secundaria produce zonas de

enriquecimiento secundario en oro en las partes lateríticas del perfil de meteorización.

La distribución de oro no es la misma para todas las fracciones: en la fracción más fina el oro es regularmente distribuido al tope del perfil de meteorización y tiende a preservar la misma concentración también lateralmente, mientras que en la fracción más gruesa el contenido máximo de Au se encuentra en el horizonte por encima de la estructura mineralizada y rápidamente su contenido disminuye lateralmente (Lecomte & Colin, 1989).

Las reservas de los depósitos lateríticos generalmente no son muy grandes, <1.5 Mt, con una ley de 1.5-5.0 g/t de Au. Estas pueden ser las únicas reservas rentables sobre la mineralización primaria no rentable. La presencia en las zonas poco profundas (generalmente <100 m) permite una explotación menos costosa a cielo abierto. Los tratamientos son generalmente los CIP/CIL (carbón en pulpa /carbón en lixiviación) en el sitio o para pequeños depósitos la lixiviación en pilas.

MOVILIZACION SUPERGENA DE ORO

La movilización de oro en las condiciones supérgenas ha sido tema de un gran número de estudios y sus resultados han sido reunidos por Boyle (1979). Sin embargo la mayoría de trabajos publicados hasta la presente, han demostrado esta movilización por evidencias indirectas. Por ejemplo Benedetti (1989) reporta que la concentración de oro en trazas

con promedio de 10^{-10} a 10^{-11} moles/litro fue encontrada alrededor de los depósitos de oro en aguas superficiales ácidas. Otras evidencias indirectas fueron dadas por Mann (1984) y Colin *et al.* (1989), reportando la presencia de cristales de oro supérgeno en los perfiles lateríticos de meteorización. Según Mann (1984), la movilización de oro en los perfiles lateríticos en el bloque Yilgarn en Australia Occidental, puede ser explicada por la presencia de altas concentraciones de cloruros en el sistema de drenaje. De acuerdo a este autor y los estudios experimentales de Krauskopf (1951) y Cloke & Kelly (1964), el oro es unido por cloruros para formar cloruros auríferos complejos en las condiciones muy ácidas, altamente oxidantes y ricas en cloruros. Sin embargo, en el ambiente superficial laterítico, las aguas ácidas superficiales son fuertemente diluidas y de esta manera los factores que controlan la movilización de oro son pobremente representados (Colin & Wieillard, 1990).

Desde los años 80 las investigaciones demostraron que el Au es móvil en condiciones supérgenas lateríticas. Se basaron en estudios petrológicos, termodinámicos y trabajos experimentales (Varajao *et al.*, 2000). La movilización supérgena de oro en los perfiles de meteorización ha sido documentada y descrita en diferentes partes del mundo (Mann, 1984; Wilson, 1984; Webster & Mann, 1984; Davy & El-Ansary, 1986; Michel, 1987; Colin *et al.*, 1989; Colin & Wieillard, 1991; Santosh & Omana, 1991; Lawrance & Griffin, 1994; Porto & Hale, 1996). La evidencia de disolución de oro

abarca la disminución del tamaño de los granos de oro, desde la parte baja hacia el tope del perfil de meteorización y la presencia de rasgos de corrosión en la superficie de los cristales primarios. La precipitación de oro es demostrada por la formación de los cristales secundarios de alta pureza y la morfología característica; algunas veces las pepitas de oro encierran goethita recién formada (Zang & Fyfe, 1993). Los datos posteriores referentes a la movilidad de oro en zona supérgena comprenden las concentraciones elevadas de oro en los ríos que drenan las zonas auríferas (Benedetti & Boulège, 1991) y el crecimiento de los granos en los sedimentos de los ríos (Eyles, 1990; McCready *et al*, 2003).

Según Mann (1984), en los perfiles lateríticos las soluciones muy ácidas de cloruros generadas por ferrólisis (oxidación e hidrólisis del hierro) son responsables por la disolución de oro y plata. El Au es subsecuentemente reprecipitado por reducción del ion AuCl_4^- con Fe^{2+} . Este refinamiento químico de oro ocurre durante la lateritización. El desarrollo de pH bajo y la redistribución de oro y plata en el perfil laterítico de meteorización parece ser más común sobre el basamento granítico y gnéisico, y puede ser inhibido por la presencia de carbonatos en la zona meteorizada de la secuencia de rocas básicas. En estas condiciones ácidas (pH de 4 a 6) la estabilidad de oro aumenta y aumenta el contenido de plata (Colin & Wieillard, 1991).

Generalizando se puede decir que el oro es particularmente móvil en los ambientes ácidos y fuertemente alcalinos, y por consiguiente las

condiciones más favorables para el enriquecimiento secundario hay en ambientes débilmente ácidos, neutros y débilmente alcalinos.

Muchos de los depósitos oxidados de oro presentan ciertas características que indican una fuerte relación entre los procesos geoquímicos y el movimiento del nivel del agua subterránea. Los procesos geoquímicos que abarcan la disolución de soluciones sólidas de oro-plata y precipitación de oro de alta pureza (bajo contenido de Ag) pueden tener lugar tanto por encima como por debajo del nivel del agua. En general la menor disponibilidad de oxígeno debajo del nivel del agua causa que estos procesos ocurran más lentamente en la zona saturada que en la parte sobreyacente del perfil no saturada con el agua. Basándose en la variación del grado de movimiento del nivel del agua hacia abajo y el grado de oxidación del oro primario y sulfuros auríferos que se encuentran en el sistema, Mann (1998) diferenció ocho tipos de yacimientos oxidados de oro: tres de ellos ocurren en perfiles relicticos, tres en perfiles erosionados y dos en perfiles deposicionales. El conocimiento de los procesos de oxidación y del estilo de oxidación de oro puede ser usado en aplicación de una estrategia óptima durante las labores de exploración.

La movilización química del oro en la zona supérgena frecuentemente está relacionada con la meteorización de los minerales sulfurosos y su subsecuente oxidación (Southam & Saunders, 2005).

En las condiciones del subsuelo el oro aparece en soluciones acuosas como coloide metálico (0) y complejos auríferos (I^+ y III^+), (Vlassopoulos *et al.*, 1990a). Se ha demostrado que los tiosulfatos rápidamente

El tiosulfato es producido durante la (bio)oxidación de minerales sulfurosos y por lo consiguiente es dominante en las aguas subterráneas que están alrededor de los depósitos sulfurosos que contienen oro (Stoffregen, 1986). El agua subterránea oxidante con altos contenidos de cloruros disueltos, lo que es común en las zonas áridas y semi-áridas, puede también solubilizar el oro conduciendo a la formación de los complejos de cloruros de oro ($[AuCl_2^-]$, $[AuCl_4^-]$ - (Krauskopf, 1951). Sin embargo el complejo de cloruro de oro ($AuCl_2$) no es estable en temperaturas bajas ($<100\text{ }^\circ\text{C}$) en condiciones oxidantes (Pan & Wood, 1991; Gammons *et al.*, 1997).

Las plantas juegan un papel esencial en la movilización de oro. Muchas plantas tropicales producen, durante el metabolismo o descomposición, el cianuro y los ácidos húmicos. El oro forma complejos con “ligands” orgánicos y complejos orgánicos de oro pueden ser importantes en soluciones de subsuelo con altas concentraciones de materia orgánica disuelta. Según *Bowell et al* (1993) en terrenos tropicales el oro es liberado durante la meteorización laterítica de las menas hipógenas y el suelo orgánico suministra los potenciales ligands de oro, entre los cuales el ácido fúlvico es el dominante componente móvil. Sin embargo,

solubilizan el oro y el tiosulfato complejo de oro $[Au(S_2O_3)_2^{3-}]$ es estable con un pH medianamente ácido a altamente alcalino y en condiciones moderadamente oxidantes a condiciones de reducción (Webster, 1986).

debido a la complejidad de la materia orgánica disuelta, los investigadores tienen resultados contradictorios en los experimentos de disolución/precipitación. Se ha demostrado que los ácidos orgánicos (ácidos húmico y fúlvico, aminoácidos y ácidos carboxílicos) favorecen la disolución del oro nativo en algunos experimentos (Boyle *et al.*, 1975; Baker, 1978). Sin embargo en otros experimentos el oro nativo no fue oxidado y más bien fue favorecida la formación de los coloides y soles de oro de los complejos de oro (I/III) - (Gray *et al.*, 1998). La interacción del oro y la materia orgánica involucra generalmente elementos como N, O o S, más que C. Vlassopoulos *et al.* (1990b) demostró que el oro se une preferentemente con el S orgánico en las condiciones de reducción, mientras que en las condiciones de oxidación se une con N y C orgánicos. Los complejos organo-auríferos pueden estar presentes en soluciones acuosas como complejos cianuros de oro (I^+). El oro (I^+) forma fuertes complejos con cianuro $[Au(CN)_2^-]$ que es estable en un amplio rango de Eh-pH (Gray, 1998).

La adsorción de los complejos y coloides de oro por la materia orgánica, arcillas, minerales de Fe y Mn, como también la bioacumulación y biomineralización pueden conducir a la formación de partículas de oro secundario, las cuales frecuentemente fueron observadas

cerca de los depósitos primarios (Webster & Mann, 1984; Webster, 1986; Lawrance & Griffin, 1994; Gray, 1998). El oro secundario es generalmente más fino comparando con el oro primario y los agregados de oro son a menudo más grandes que en la roca madre (Wilson, 1984; Mossman *et al.*, 1999).

Machesky *et al* (1991) estudiaron la adsorción de cloruros de oro (III^+) y aniones de tiosulfato de oro (I^+) en la goethita y la adsorción del oro acuoso por goethita, esmectita y caolinita ha sido investigada por Cohen & Waite (2004), en función de pH a 25°C. Las isotermas de adsorción indican que el Au es principalmente adsorbido como complejos aniónicos con límite de adsorción pH 8.5 para goethita, 7.5 para esmectita y 8.0 para caolinita. No se puede excluir la posibilidad de que el Au coloidal interactúa con la superficie del mineral. Una zona de lenta adsorción de los complejos de $\text{Au}(\text{III}^+)$ existe para la goethita con pH <6.5 y para la caolinita con pH <8. La adsorción por la goethita en el rango de pH entre 7–9 es más rápida y puede ser atribuida a la adsorción de $\text{Au}(\text{OH})_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})^0$. Ran *et al* (2002) estudiaron la adsorción de los complejos $\text{Au}(\text{I}^+, \text{III}^+)$ en los óxidos de Fe, Mn y ácido húmico. La adsorción de AuCl_4^- , AuCl_2^- y $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ con bajas concentraciones de Au, en las aguas más supérgenas, en la goethita, birnessita y ácidos húmicos fue investigada con pH 4. Con un pH 4 la adsorción de $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ es significativamente más grande que la de AuCl_4^- en la birnessita, pero la adsorción de $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ es significativamente más pequeña para la goethita y ácido húmico. Sin

embargo la adsorción de AuCl_4^- y AuCl_2^- en el ácido húmico es similar a la de birnessita y goethita para soluciones con pH más alto. Como la birnessita tiene muy fuerte capacidad de oxidación y adsorción para complejos de Au^+ , tales como $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$, puede jugar un papel muy importante en la depositación y acumulación de oro disuelto en el ambiente supérgeno.

Se comprobó que los microorganismos capaces de disolver y precipitar el oro, desempeñan un papel mucho más importante en el ciclo biogeoquímico de lo que se creía inicialmente. Las recientes investigaciones sugieren que bacterias y arqueas están involucradas en cada etapa del ciclo biogeoquímico del oro, desde la formación de la mineralización primaria hasta su disolución, dispersión y re-concentración como oro secundario en las condiciones de subsuelo (Reith *et al.*, 2007, Reith & McPhail, 2007).

La bioacumulación de oro por algunos microorganismos fue estudiada en laboratorio para aclarar la interacción entre el oro y los microorganismos, usando principalmente el cloruro de oro (III) (Kashefi *et al.*, 2001; Ahmad *et al.*, 2003; Nakajima, 2003; Lengke *et al.*, 2006), tiosulfato de oro (I) (Aylmore & Muir, 2001; Lengke and Southam, 2007), ácido nítrico y solución ácida de tiourea (Chacraborty *et al.*, 2009) y soluciones que contienen oro coloidal (Ulberg *et al.*, 1992). El estudio con 30 diferentes microorganismos (ocho bacterias, nueve actinomicetos, ocho hongos y cinco levaduras (Nakajima, 2003),

demonstraron que las bacterias fueron más eficientes removiendo los complejos de oro (I/III) de las soluciones que otros grupos de microorganismos. Estos resultados fueron confirmados por Tsuruta (2004), quien estudió la bioacumulación de cloruro de oro (III) en 75 diferentes especies (25 bacterias, 19 actinomicetos, 17 hongos y 14 levaduras), y encontró que las bacterias como *Acinetobacter calcoaceticus* y *P. aeruginosa*, tienen la mayor capacidad de acumulación de oro. Algunas bacterias demuestran la capacidad de precipitar los complejos de oro selectivamente y/o activamente, lo que sugiere que la bioacumulación de oro en estos organismos puede ser parte del proceso metabólico, y no una biosorción pasiva que a menudo es observada en hongos y algas (Khoo & Ting, 2001; Nakajima, 2003). Lengke (2004) en los experimentos con bacterias que reducen los sulfatos y acumulan el oro determinó que el oro es precipitado inicialmente en la superficie de las bacterias en forma framboidal e irregular. Mientras el oro framboidal fue formado solamente en la superficie de *Desulfovibrio* spp., las formas irregulares de oro fueron asociadas con otros tipos de bacterias.

PRECIPITACION DE ORO EN CONDICIONES SUPERGENAS

Existen varios mecanismos que conducen a la precipitación del oro de las soluciones que migran en la zona de oxidación (Machairas, 1967; Boyle *et al.*, 1975):

- Cambio de pH de la solución: el aumento de pH destruye los cloro-

complejos de oro y causa la precipitación del oro nativo; la disminución de pH produce un efecto similar sobre los complejos alcalinos como $[AuS]$, $[Au(HS)_2]$, thiosulfato, sulfito, etc. con precipitación de oro nativo.

- Precipitación de oro nativo de la solución por el ion ferroso - cuando soluciones que contienen oro se topan con este ion en las zonas donde predomina leve oxidación, el oro nativo es precipitado. Este mecanismo es muy importante en los yacimientos que contienen pirita, pirrotina, arsenopirita, siderita y probablemente es el principal mecanismo de precipitación de oro en muchos gossans y también en zona de reducción (zona de sulfuros supérgenos).

- Precipitación de oro nativo de la solución por el ion mangánífero en las soluciones levemente ácidas, neutras o alcalinas. Ocurre en las partes más profundas de los gossans y de los depósitos de oro oxidados. El oro nativo es frecuentemente absorbido o adsorbido por el óxido hidratado de manganeso en forma muy fina.

- Adsorción y/o coprecipitación de los complejos de oro cargados negativamente y coloides por los geles cargados positivamente, p.ej. por limonita. Se comprobó que los óxidos de hierro gelatinoso, cercanos a los depósitos de oro, generalmente son enriquecidos en oro. Los minerales

arcillosos y complejos silicáticos gelatinosos en las zonas de oxidación de los depósitos de oro también tienden a concentrar el Au. Otras substancias naturales, parecidas a geles, como geles húmicos, húmico-limoníticos, geles de humus-limonita-wad-alumina, ocre de bismuto, ocre de telurio, ocre de arsénico y antimonio amorfo también tienden a precipitar el oro fácilmente.

- Coagulación y/o precipitación de los coloides de oro por varios iones, soles y geles. La importancia de este mecanismo no es bien conocida porque no hay datos sobre el transporte del oro como coloide en las zonas de oxidación de los yacimientos de oro.

- Precipitación debido a la presencia de algunos reductores naturales, como son prácticamente todos sulfuros, silicatos, carbonatos, metales nativos, minerales arcillosos, substancias carbonáceas y gran variedad de hidróxidos supérgenos, arseniatos, etc.

- Coprecipitación y/o adsorción por numerosos minerales supérgenos, como bismutita, clorargilita, jarosita, beudantita, bindheimita, malaquita, azurita, yeso, azufre nativo, piromorfita, escorodita y varios otros fosfatos, vanadatos, arseniatos y antimoniatos.

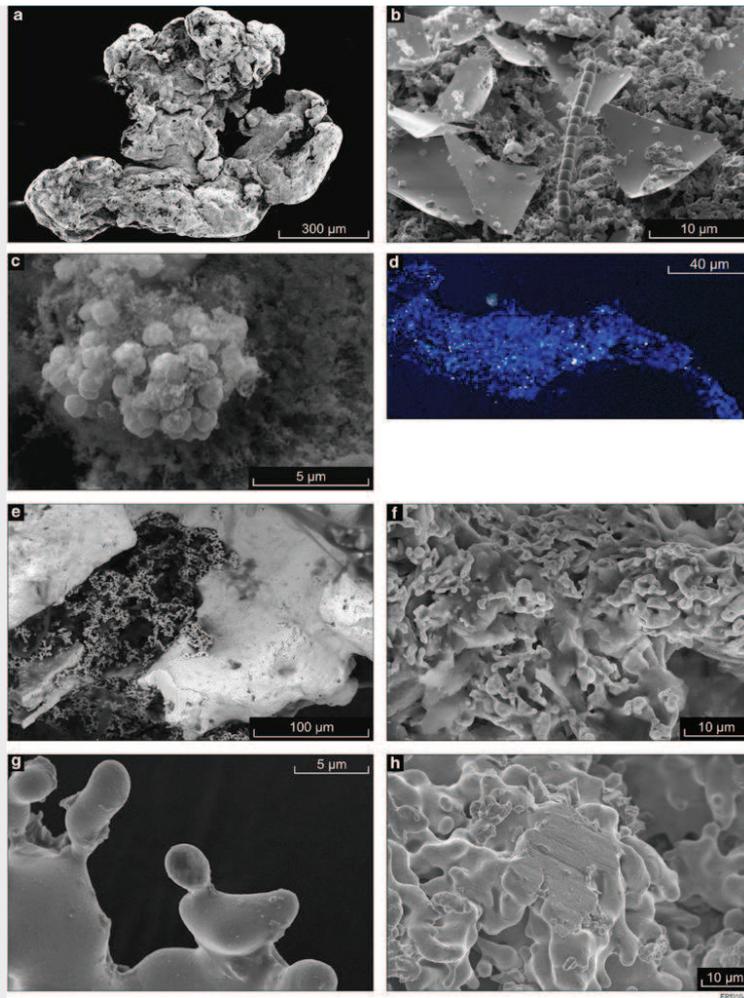
- Precipitación de oro por H_2S que ocurre cuando en la solución hay ausencia de agentes solubilizantes, tales como carbonatos de los álcalis.

- Precipitación de oro por reacción con sulfuros supérgenos e hipógenos.

En condiciones de laboratorio se comprobó que cuando una solución de HCl que contenía cierta cantidad de $AuCl_4^-$ y nitrato férrico fue diluida hasta obtener pH neutro o alcalino, esto condujo a la precipitación de oro y fases de óxido de hierro (ferrihidrita y goethita). El mismo experimento se realizó en ausencia de hierro. La mayor parte de oro fue removida de la solución en presencia de los óxidos de hierro, mientras cuando no hubo óxidos de hierro, el oro permanecía disuelto en la solución. Esto sugiere que los óxidos de hierro son altamente eficientes en atrapar el oro de las soluciones y favorecen la precipitación de oro en los sistemas ricos en Fe con Au (Greffie *et al*, 1996).

FORMA DE ORO EN LOS DEPOSITOS SUPERGENOS.

Un análisis detallado de la morfología del oro nativo en los depósitos supérgenos permitió diferenciar tres tipos principales de oro: relictos, alterado y neogénico. Los relictos de oro retienen todas las características particulares de estructura y composición del oro primario. El oro alterado se presenta como granos de alta calidad de oro poroso; este oro es curvado y forma agregados esponjosos o en forma de panal. El oro neogénico o secundario generalmente tiene una forma particular, parecida a microesférulas y dendritas, también se presenta como cristales que tienen forma de octaedros, cristales con los filos y topes muy puntiagudos y otros con formas suaves, lisas



Bioaccumulation of gold by microorganisms may lead to biomineralization of secondary gold. **(a)** An SEM micrograph of a secondary gold grain from the Tomakin Park Gold Mine (New South Wales, Australia); **(b)** SEM micrograph of octahedral gold platelets from cyanobacteria– AuCl_4^- experiments (after 28 days incubation at 25 °C with 500 p.p.m. of gold as $[\text{AuCl}_4^-]$); **(c)** SEM micrograph of a biofilm growing on a gold pellet incubated for 70 days in a biologically active slurry microcosms with soil from the Tomakin Park Gold Mine; **(d)** confocal microscopic images of a fluorescently stained (DAPI) biofilm on a secondary gold grain from the Hit or Miss Gold Mine (Queensland, Australia); **(e, f)** surface depression of gold grain extensively covered with a three-dimensional network of 'bacterioform' gold on a gold grain from the Hit or Miss Gold Mine; **(g, h)** detail of a rounded and budding cell pseudomorph forming 'bacterioform' gold from the Waimumu–Waikaka Quartz Gravels, New Zealand (adapted from Falconer *et al.*, 2006).

y sin brillo. Muchos de los cristales de oro presentan en los bordes cierto escalonamiento (Shcherbov *et al*, 2005). Algunas veces el oro secundario forma una corteza alrededor de los granos fuertemente grabados. El estudio bajo el microscopio electrónico revela la gran variedad de los esquemas de crecimiento del oro secundario, incluyendo la forma esponjosa, de filamentos, pétalos o dendritas. Se encontraron unos ejemplares espectaculares de oro “pintado” con brillo intenso que se precipitó sobre granos primarios casi mates. Los análisis de granos de oro secundario demuestran el contenido mayor a 99.93% de Au y la pureza de oro (1000 Au/Au+Ag) que va de 991 a 999 (Santosh & Omana, 1991).

En depósitos supérgenos de oro secundario es visible algunas veces, pero en mayoría de los casos se caracteriza por gran finura, su tamaño es menor a 1 μm . El tamaño de las partículas de oro disminuye gradualmente en el perfil laterítico desde 600 μm en saprolita, por 320 μm en zona moteada hasta 240 μm en ferricreta, lo que está relacionado con la intensidad de meteorización. En las rocas intensamente meteorizadas el oro aparece en granos (>500 μm) y más raramente como grandes pepas (>4 mm o 1 g). Muchas de estas pepas tienen forma irregular redondeada o mamilar (Wilson, 1983). Durante largo tiempo se especulaba si las pepitas de oro, son de origen supérgeno o hipógeno. El estudio realizado en más de 30 pepitas de diferentes localidades de Australia, de tamaño desde 1 g hasta más de 8 kg, demostró que las pepitas son de origen hipógeno y que no se formaron

por el crecimiento supérgeno (Hough, R. *et al*, 2007a).

Diferentes científicos han estudiado la forma del oro en los depósitos supérgenos que se formaron en diferentes ambientes, en diferentes partes del mundo. La evolución morfológica de partículas de oro en el perfil laterítico, debajo del bosque lluvioso fue estudiada por Colin *et al* (1989), Freyssinet *et al* (1989) y Larizzatti *et al* (2008). Se determinó que predominan los granos irregulares y en pequeña proporción están presentes las formas dendríticas y prismáticas. Generalmente en la superficie de las partículas aparecen vacíos y hoyos de corrosión; su número y tamaño aumenta hacia la superficie. Los bordes de las partículas se vuelven progresivamente menos puntiagudos, más redondeados y su superficie más grabada, con más hoyos desde la base hacia el tope del perfil (Colin & Wieillard, 1991). Estos cambios morfológicos están atribuidos a la disolución del oro a través del tiempo.

Un poco diferente es la forma del oro en los depósitos supérgenos, donde el oro se precipitó de las aguas salinas. En el yacimiento Hannan South en Australia un depósito se encuentra debajo de un efímero sistema de lagos y al menos en parte es saturado por agua subterránea altamente salina. En este yacimiento los granos de oro son gruesos y bien preservados, de alta pureza, lo que es poco frecuente en yacimientos de este tipo. Los más frecuentes son los pequeños octaedros, mayores de 50 μm , pero grandes láminas y octaedros

mayores de 3 mm, son comunes. La variación de la morfología de los cristales sugiere que el oro es inicialmente precipitado como euhedrales octaedros y láminas. La subsiguiente disolución y recristalización asociada con fluctuaciones en el ambiente químico, por encima del frente redox, condujo al desarrollo de las formas más comunes irregulares, dendríticas o en forma de alambres, observados en otros depósitos supérgenos (Lawrance & Griffin, 1994). En el yacimiento Golden Virgin en Australia los granos de oro supérgeno son de color gris oscuro y los cristales tienen solamente 20-50 nm de espesor. Este oro aparece asociado con cristales de sal, algunos granos están entrecrecidos con baritina, apoyando la tesis que el oro nativo (aleación Au/Ag) fue disuelto localmente por las aguas subterráneas, la Ag permaneció en la solución y el oro puro fue precipitado del agua subterránea salina y levemente ácida durante los períodos de sequía (Hough et al, 2007b, Hough et al, 2008).

Wilson (1984) estudió la forma del oro supérgeno en varias localidades de Australia y encontró oro supérgeno casi puro en las zonas meteorizadas con gossans. El oro ha tenido las siguientes formas: (1) octaedros de gran pureza (0.5 mm diámetro) colocados en la superficie de óxido de Mn o en arcillas; (2) formas arborescentes en varios tipos de roca decompuesta; (3) oro dendrítico en grietas en roca meteorizada, arcilla y laterita; (4) impregnaciones de oro en madera fosilizada y

materia carbonácea; (5) algunas pepitas de oro de forma mamilar.

REFERENCIAS

- [1] AHMAD A., SENAPATI S., KHAN M.I., KUMAR R., RAMANI R., SRINIVAS V. & SASTRY M., (2003), Intracellular synthesis of gold nanoparticles by a novel alkalotolerant actinomycete, *Rhodococcus* species, *Nanotechnology* v.14, pp. 824-828.
- [2] AYLMOORE M.G. & MUIR D. M., (2001), Thiosulfate leaching of gold—A review, *Minerals Engineering*.
- [3] BAKER W.E., (1978), The role of humic acid in the transport of gold, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 42, Issue 6, Part 1, pp. 645-649.
- [4] BENEDETTI M. & BOULEGE J., (1991), Mechanism of gold transfer and deposition in a supergene environment, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 55, Issue 6, pp. 1539-1547.
- [5] BOWELL R.J., GIZE A.P. & FOSTER R.P., (1993), The role of fulvic acid in the supergene migration of gold in tropical rain forest soils, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 57, Issue 17, pp. 4179-4190.
- [6] BOYLE, R.W. et al., (1979), Oxidation and secondary enrichment of gold deposits. Geological Survey of Canada, Bulletin 280, pp.431-435.

- [7] BOYLE, R.W. et al., (1975), Some observations on solubility of gold, Geological Survey of Canada, Pap. 63-23, p. 6.
- [8] BUTT C. R. M. (1998), Supergene Gold Deposits, AGSO Jour. of Aust. Geol. & Geophys., v.17, no. 4, pp. 89-96.
- [9] CHACRABORTY N., BANERJEE A., LAHIRI S., PANDA A., GHOSH A.N. & PAL R., (2009), Biorecovery of gold using cyanobacteria and an eukaryotic alga with special reference to nanogold formation – a novel phenomenon, Journal of Applied Phycology, Volume 21, Number 1, pp. 145-152.
- [10] CLOKE P. L. & KELLEY W. C., (1964), Solubility of Gold under Inorganic Supergene Conditions, Economic Geology, 59 (2), pp. 259–270.
- [11] COHEN D.R. & WAITE T.D., (2004), Interaction of aqueous Au species with goethite, smectite and kaolinite, Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis; V. 4; no. 3; p. 279-287.
- [12] COLIN F., SANFO Z., BROWN E., BOURLES D. & MINKO A.E., (1997), Gold: a tracer of the dynamics of tropical laterites, Geology; v. 25; no. 1; p. 81-84.
- [13] COLIN F. & VIEILLARD P., (1991), Behaviour of gold in the lateritic equatorial environment: weathering and surface dispersion of residual gold particles, at Dondo Mobi, Gabon, Applied Geochemistry, Volume 6, Issue 3, pp. 279-290.
- [14] COLIN F. & VIEILLARD P., (1990), Dissolution and translocation of residual gold particles under equatorial lateritic conditions, Chemical Geology, Volume 84, Issues 1-4, pp. 38-39.
- [15] COLIN F., LECOMTE P. & BOULANGE B., (1989), Dissolution features of gold particles in a lateritic profile at Dondo Mobi, Gabon, Geoderma, Volume 45, Issues 3-4, pp. 241-250.
- [16] DAVY R. & EL-ANSARY M., (1986), Geochemical Patterns in the Laterite Profile at the Boddington Gold Deposit, Western Australia, Journal of Geochemical Exploration, pp.119–144.
- [17] EYLES N., (1990), Glacially derived, shallow-marine gold placers of the Cape Yakataga district, Gulf of Alaska, Sedimentary Geology, Volume 68, Issue 3, pp. 171-185.
- [18] FALCONER D.M., CRAW D., YOUNGSON J.H. & FAURE K., (2006), Gold and sulphide minerals in Tertiary quartz pebble conglomerate gold placers, Southland, New Zealand. In: Els BG, Eriksson PG (eds). Ore Geology Reviews 28, Special Issue: Placer Formation and Placer Minerals. pp 525–545.
- [19] FREYSSINET P., (1994), Gold mass balance in lateritic profiles from savanna and rain forest zones, CATENA, Volume 21, Issues 2-3, pp. 159-172.

- [20] FREYSSINET P., (1993), Gold dispersion related to ferricrete pedogenesis in South Mali: application to geochemical exploration. Chronique de la Recherche Minière, No. 50, pp. 25-40.
- [21] FREYSSINET P., ZEEGERS H. & TARDY Y., (1989), Morphology and geochemistry of gold grains in lateritic profiles of southern Mali, Journal of Geochemical Exploration, Volume 32, Issues 1-3, pp. 17-31.
- [22] GAMMONS C.H. & WILLIAMS-JONES A.E., (1997), Chemical mobility of gold in the porphyry-epithermal environment, Economic Geology; v. 92; no. 1; p. 45-59.
- [23] GRAY D.J., (1998), The aqueous chemistry of gold in the weathering environment. Cooperative Research Centre for Landscape Evolution and Mineral Exploration, Open File Report, 38. Wembley West: Australia.
- [24] GRAY D.J., LINTERN M.J., LONGMAN G.D., (1998), Chemistry of gold-humic interactions. Cooperative Research Centre for Landscape Evolution and Mineral Exploration, Open File Report, 43. Wembley West: Australia.
- [25] GREFFIE C., BENEDETTI M.F., PARRON C. & AMOURIC M., (1996), Gold and iron oxide associations under supergene conditions: An experimental approach, Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 60, Issue 9, pp. 1531-1542.
- [26] HOUGH R.M., HART R.D., NOBLE R., VAUGHAN D., REDDY S.M., HITCHEN G., SAUNDERS M., CLODE P., LOWE J., GRAY D.J., ANAND R.R., BUTT C.R.M. & VERRALL M., (2008), Naturally occurring gold nanoparticles and nanoplates, Geology; v. 36; no. 7; pp. 571-574.
- [27] HOUGH, R.M., BUTT, C.R.M., REDDY, S.M. & VERRALL, M., (2007a), Gold nuggets: supergene or hypogene?, Australian Journal of Earth Sciences, 54 (7), pp.959-964.
- [28] HOUGH R.M., HART R.D., NOBLE R., VAUGHAN D., REDDY S.M., HITCHEN G., SAUNDERS M., CLODE N. & ANAND R.R., (2007b), Natural Ultrathin Nanoplates of Supergene Gold, ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings (November 4-8, 2007).
- [29] KASHEFI K., TOR J.M., NEVIN K.P., & LOVLEY D.R., (2001), Reductive Precipitation of Gold by Dissimilatory F (III)-Reducing Bacteria and Archaea, Applied and Environmental Microbiology, Vol. 67, No. 7, pp. 3275-3279.
- [30] KHOO K. & TING Y., (2001), Biosorption of gold by immobilized fungal biomass. Biochemical Engineering Journal, 8, pp.51-59.
- [31] KRAUSKOPF K.B., (1951), The solubility of gold, Economic Geology; v. 46; no. 8; p. 858-870.

- [32] LARIZZATTI J.H. , OLIVEIRA S.M.B. & BUTT C.R.M, (2008), Morphology and composition of gold in a lateritic profile, Fazenda Pison “Garimpo”, Amazon, Brazil, Journal of South American Earth Sciences, Volume 25, Issue 3, pp. 359-376.
- [33] LAWRENCE, L. M., GRIFFIN, B. J., (1994), Crystal features of supergene gold at Hannan South, Western Australia, Mineralium Deposita, Volume 29, Issue 5, pp.391-398.
- [34] LECOMTE P & COLIN F., (1989), Gold dispersion in a tropical rainforest weathering profile at Dondo Mobi, Gabon, Journal of Geochemical Exploration, Volume 34, Issue 3, pp. 285-301.
- [35] LENGKE, M. F., (2004), The role of sulphate-reducing bacteria on the formation of supergene gold, Memory of Denver Annual Meeting (November 7–10, 2004).
- [36] LENGKE M.F. & SOUTHAM G., (2007), The Deposition of Elemental Gold from Gold(I)-Thiosulfate Complexes Mediated by Sulfate-Reducing Bacterial Conditions, Economic Geology; v. 102; no. 1; p. 109-126.
- [37] LENGKE M.F., RAVEL B., FLEET M.E., WANGER G., GORDON R.A. & SOUTHAM G., (2006), Mechanisms of Gold Bioaccumulation by Filamentous Cyanobacteria from Gold(III)-Chloride Complex, Environmental Science & Technology, 40, pp. 6304–6309.
- [38] LIMA DA COSTA M., (1993), Gold distribution in lateritic profiles in South America, Africa, and Australia: applications to geochemical exploration in tropical regions, Journal of Geochemical Exploration, Volume 47, Issues 1-3, pp. 143-163.
- [39] MACHAIRAS, G., (1967), Dissolution et recristallisation de l'or primaire pendant l'oxydo-reduction des sulfures auriferes; BRGM - Francia, Bull. (2^e Ser.), Sec. 2, no. 3, p. 1-109.
- [40] MACHESKY M.L., ANDRADE W.O. & ROSE W., (1991), Adsorption of gold(III)-chloride and gold(I)-thiosulfate anions by goethite, Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 55, Issue 3, pp.769-776.
- [41] MANN A.W., (1998), Oxidised gold deposits: Relationships between oxidation and relative position of the water-table, Australian Journal of Earth Sciences, Volume 45, Issue 1, pp. 97 – 108.
- [42] MANN A.W., (1984), Mobility of gold and silver in lateritic weathering profiles: some observation from Western Australia, Economic Geology, 79, pp.38-49.
- [43] MCCREADY A.J., PARNELL J. , CASTRO L., (2003), Crystalline Placer Gold from the Rio Neuquén, Argentina: Implications for the Gold Budget in Placer Gold Formation, Economic Geology; V. 98; no. 3; pp. 623-633.

- [44] MICHEL, D., (1987), Concentration of gold in in situ laterites from Mato Grosso. Mineralium Deposita, vol. 22, pp. 185-189.
- [45] MOSSMAN D.J., REIMER T. & DURSTLING H., (1999), Microbial processes in gold migration and deposition: modern analogues to ancient deposits. Geoscience Canada 26, pp. 131–140.
- [46] NAKAJIMA A., (2003), Accumulation of gold by microorganisms, World Journal of Microbiology and Biotechnology, V. 19, Number 4, pp. 369-374.
- [47] PAN P. & WOOD S., (1991), Gold-chloride complexes in very acidic aqueous solutions and at temperatures 25-300 °C: A laser Raman spectroscopic study, Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 55, Issue 8, pp.2365-2371.
- [48] PORTO C.G. & HALE M., (1996), Mineralogy, morphology and chemistry of gold in the stone line lateritic profile of the Posse deposit, Central Brazil, Journal of Geochemical Exploration, Volume 57, Issues 1-3, pp. 115-125.
- [49] RAN Y., FU J. , RATE A.W. & GILKES R.J., (2002), Adsorption of Au(I, III) complexes on Fe, Mn oxides and humic acid, Chemical Geology, Volume 185, Issues 1-2, 15, pp. 33-49.
- [50] REITH F., LENGKE M.F., FALCONER D., CRAW D. & SOUTHAM G., (2007), The geomicrobiology of gold, The ISME Journal 1, pp.567–584.
- [51] REITH F. & MCPHAIL D.C., (2007), Mobility and microbially mediated mobilization of gold and arsenic in soils from two gold mines in semi-arid and tropical Australia, Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 71, Issue 5, 1 pp. 1183-1196.
- [52] SANTOSH M. & OMANA P.K., (1991), Very high purity gold form lateritic weathering profiles of Nilambur, southern India, Geology; V. 19; no. 7; pp. 746-749.
- [53] SHCHERBOV B. L., STRAKHOVENKO V. D., ZHMODIK S. M. & KALININ Yu. A., (2005), Typomorphism and Formation Conditions for Gold in Weathering Crusts of the Pervomaisk Zone (Central Kazakhstan), Geology of ore deposits, - Vol. 47, No. 2, pp. 155-176.
- [54] SOUTHAM G. & SAUNDERS J.A., (2005), The Geomicrobiology of Ore Deposits, Economic Geology; V. 100; no. 6; pP. 1067-1084.
- [55] STOFFREGEN R., (1986), Observations on the behaviour of gold during supergene oxidation at Summitville, Colorado, USA, and implications for electrum stability in the weathering environment. Applied Geochemistry, 1, pp.549-558.
- [56] TSURUTA T., (2004), Biosorption and recycling of gold using various microorganisms. Journal of General and Applied Microbiology, 50, pp. 221–228.

- [57] ULBERG Z.R., KARAMUSHKA V.I. & VIDYBIDA A.K., (1992), Interaction of energized bacteria cells with particles of colloidal gold: peculiarities and kinetic model of the process. Biochim Biophys Acta 1134, pp. 89–95.
- [58] VARAJAO C.A.C., COLIN F., VIEILLARD P., MELFI A.J. & NAHON D., (2000), Early weathering of palladium gold under lateritic conditions, Maquiné Mine, Minas Gerais, Brazil, Applied Geochemistry, Volume 15, Issue 2, pp. 245-263.
- [59] VLASSOPOULOS D., WOOD S.A., MUCCI A., (1990a), Gold speciation in natural waters: I. Solubility and hydrolysis reactions of gold in aqueous solution. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54, pp.3–12.
- [60] VLASSOPOULOS D., WOOD S.A., MUCCI A., (1990b), Gold speciation in natural waters: II. The importance of organic complexing—Experiments with some simple model ligands.. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54, pp. 1575–1586. .
- [61] WEBSTER, J. G., (1986), The solubility of gold and silver in the system Au-Ag-S-O₂-H₂O at 25°C and 1 atm., Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 50, Issue 9, pp.1837-1845.
- [62] WEBSTER H.G. & MANN A.W., (1984), The influence of climate geomorphology and primary geology on the migration of gold and silver., Journal of Geochemical Exploration, Volume 22, pp. 21-42.
- [63] WILSON A.F., (1984), Origin of quartz-free gold nuggets and supergene gold found in laterites and soils — a review and some new observations, Australian Journal of Earth Sciences, Volume 31, Issue 3, pp. 303 – 316.
- [64] WILSON A F., (1983), The economic significance of non-hydrothermal transport of gold, and of the accretion of large gold nuggets in laterite and other weathering profiles in Australia., ICAM 81. Proceedings of the First International Congress on Applied Mineralogy. Special Publication No.7, 229-234.
- [65] ZANG W. & FYFE W.S., (1993), A three-stage genetic model for the Igarape Bahia lateritic gold deposit, Carajas, Brazil, Economic Geology; V. 88; no. 7; pp. 1768-1779.