

# FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ALEACIÓN Au-Si EN COMPOSICIONES PRÓXIMAS AL EUTÉCTICO

Julián Tobón<sup>1</sup>, Ángela Zapata<sup>2</sup>, Alejandro Orozco<sup>2</sup>, Ángela Baena<sup>2</sup>, Claudia Serna<sup>3</sup>, Héctor Sánchez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Estudiante de Maestría en Ingeniería, Universidad de Antioquia

<sup>2</sup>Estudiante de Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia

<sup>3</sup>Docente del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, Universidad de Antioquia, Calle 67 # 53-108, Ciudad Universitaria, Bloque 18, Teléfono 57-4- 2195540, e-mail: [claserna@udea.edu.co](mailto:claserna@udea.edu.co)

## Resumen

La Aleación Au-Si en su composición eutéctica presenta un punto de fusión cercano a los 369°C y color similar al oro de alta ley. Estas características pueden ser aprovechadas en el campo de la joyería y la electrónica para utilizarla como aporte de soldadura blanda, manteniendo su alta ley. En este estudio se presentan resultados de fabricación de las aleaciones de oro con 2.5, 2.8 y 3.0 % de silicio, por medio de la fusión en un horno de plasma con atmósfera inerte de argón y su caracterización en composición química por medio de espectrometría de dispersión de longitud de onda (WDS) y espectroscopía de dispersión de energía (EDS), análisis microestructural por microscopía óptica (OM) y microscopía electrónica de barrido (SEM), microdureza Vickers (HV) y determinación de color por espectrofotometría.

**Palabras Clave:** Aleaciones Au-Si, Soldadura blanda

## Abstract

The Au-Si alloy in eutectic composition presents a melting point close to the 369 ° C and color similar to high grade gold. These features can be used in the field of jewelry and electronics for use as input for soldering, maintaining its high grade. This study presents the results of manufacture of gold alloys with 2.5, 2.8 and 3.0% silicon, this alloys were melted in a plasma furnace with inert argon atmosphere and they were characterized in chemical composition through Wavelength-dispersive spectroscopy (WDS) and Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), microstructural analysis by optical microscopy (OM) and Scanning Electron Microscopy (SEM), Vickers hardness (HV) and determination of color by spectrophotometry.

**Key Words:** Au-Si Alloys, B

## Introducción

El oro (Au) es un metal precioso que en su estado puro se caracteriza por tener alta ductilidad, baja dureza y baja resistencia a la tracción. Con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas y a la vez el desempeño en sus diferentes campos de aplicación, es necesario alearlo con otros elementos, mejorando así la resistencia la tracción y aumentando los valores de dureza. En el campo de la joyería además de las propiedades mecánicas, el color es una propiedad muy importante que varía de acuerdo a la ley de la aleación (la cual indica el grado de pureza del oro) y nominalmente se definen como 10, 14, 18 o 24 quilates [1].

Las aleaciones base oro con menos de 2% de aleantes se han denominado aleaciones de alta ley, tradicionalmente ha tenido aplicaciones limitadas por las bajas propiedades mecánicas. No obstante, se han realizado algunas investigaciones para mantener la alta ley con tenores de oro, usando como aleante el titanio, el cual permite mejorar las propiedades mecánicas y a su vez conservar el color amarillo característico del oro puro [2-4]. En este tipo de aleaciones, una de las alternativas para la fabricación de joyas mas económicas es por medio de láminas delgadas conformadas y unidas por procesos de soldadura blanda, lo cual exige el uso de material de aporte que conserve las características de alta ley del sustrato. Se han realizado algunos estudios sobre diferentes aleaciones para usarse como material de aporte para este propósito [5]. Este material de aporte deberá cumplir con diferentes requerimientos, el principal es tener un bajo punto de fusión, por debajo de 450°C, para evitar la modificación de la microestructura del sustrato que puede deteriorar las propiedades mecánicas.

Aleaciones Au-Si con composiciones próximas al eutéctico presentan propiedades que la hacen apta para aplicaciones como metal de aporte en oro de alta ley. Particularmente el bajo punto de fusión, fluidez, acción capilar (coeficiente de esparcido y mojabilidad), adherencia y el color amarillo similar al sustrato, son las características que la hacen más atractiva [5]. La influencia del silicio en las aleaciones de oro depende de su concentración y de la composición de la aleación, y se debe asumir que una óptima concentración de silicio debe desarrollarse para cada aplicación particular. De un lado, se reporta que adiciones de silicio cercanas a 0.25% en oro fundido de 9 quilates mejora la ductilidad [6]. De otro lado, se reporta el efecto fragilizante del silicio en oro de 18 quilates fundido, mejorando sus propiedades con adiciones de níquel y de cobalto [7]. No se han encontrado trabajos que reporten el comportamiento de la aleación Au-Si con composición próximas al eutéctico para ser utilizados como material de aporte en soldaduras blandas de oro de alta ley.

En la figura 1 se muestra el diagrama de fase Oro-Silicio [5], en este se puede ver que el Silicio no presenta solubilidad en el oro además de bajar la temperatura de fusión de este hasta 369 °C en el punto eutéctico con una composición de 3.16% Si. Esta es una característica que lo hace adecuado como metal de aporte para soldadura blanda de oro.

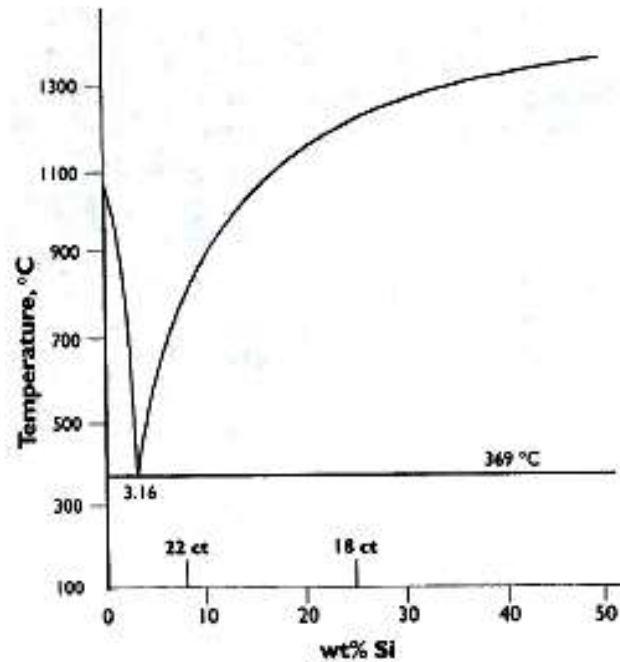


Figura1. Diagrama de fase Au- Si [5]

El objetivo de este trabajo es fabricar y caracterizar tres aleaciones de oro con porcentajes nominales de silicio próximos al eutéctico en composiciones de 2.5, 2.8 y 3.0 %, para posteriormente evaluar su posibilidad de uso como material de aporte en soldadura blanda de aleaciones de oro de alta ley.

### Metodología

Para la fabricación de las aleaciones Au-Si fue necesario partir de oro y silicio puro. Para obtener oro puro se partió de oro comercial de 18 quilates el cual se sometió a un proceso de refinación por el método de ácido nítrico [8]. En este método se disuelve el oro de 18 quilates con cobre electrolítico en una relación 1:3 en peso, en una solución de ácido nítrico con temperatura controlada, esta disolución favorece la precipitación del oro puro.

El silicio utilizado para la producción de las aleaciones fue triturado y separado por las partículas pasantes malla 10 (2 mm) y retenidas malla 20 (1 mm). Tanto el oro como el silicio fueron caracterizados utilizando ensayos de densidad y análisis de composición EDS.

La fusión de las aleaciones Au-Si se realizó en un horno de fusión por plasma con atmósfera inerte de argón construido en la Universidad de Antioquia, el cual se muestra en la figura 2. En esta etapa fue importante garantizar las mismas condiciones de calentamiento, temperatura de fusión, tiempo de permanencia y régimen de enfriamiento para la disolución del silicio en el oro. La atmósfera de argón, con un flujo de 50 CFH (pies cúbicos por hora), permitió controlar las pérdidas de silicio durante la fusión. Este control se garantizó controlando la corriente máxima de 90 amperios, y un tiempo de permanencia de tres minutos, después de la fusión del oro, se disminuyó la corriente a razón de 35 amperios por minuto. El metal fue fundido en crisoles de alúmina dentro de refractario aislante para concentrar el calor.

Se fabricaron tres aleaciones base oro con porcentajes nominales de silicio de 2.5, 2.8 y 3.0 los cuales están cercanos a lo composición eutéctica conforme se observa el diagrama de fases de Au-Si que se muestra en la figura 1.



Figura 2. Horno de fusión por plasma

A las aleaciones obtenidas se realizaron mediciones de densidad y análisis de composición química por el método EDS y WDS para confirmar el contenido de oro. Para la caracterización microestructural se realizó pulido convencional y acabado en paño con alúmina de  $3\mu\text{m}$  y luego atacadas con agua regia recién preparada. Posteriormente fueron observadas en microscopio óptico marca OLYMPUS modelo PME3 y en microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6490LV. Se realizaron ensayos de dureza Vickers con carga de 3 Kg en durómetro marca Härteprüfer Gnehm referencia Swiss Max 300. Se midió microdureza Vickers con carga de 100g, en un microdurómetro marca Shimadzu modelo NT M001, y estudio de color por espectrometría óptica en un espectrómetro AVANTES AVAESPEC-2048.

## Resultados y discusión

Los análisis de composición química obtenidos por EDS y la densidad del oro refinado, utilizados para la fabricación de las aleaciones se muestran en la tabla 1. Estos resultados evidencian la pureza de las materias primas.

Tabla 1. Resultados de la caracterización de las materias primas

Material	Densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Composición (%w)
Si		98.86-balance oxígeno
Au	19.25	100.00

En la figura 3 se muestran las micrografías obtenidas por microscopía óptica. Se observa que la microestructura está compuesta por un constituyente principal conformado por una matriz de oro (fase clara) y precipitados de Silicio (fase oscura). Se evidencia la presencia de dendritas, las cuales son constituidas principalmente por oro.

En la figura 4 se muestran las imágenes obtenidos por SEM y el mapeo de composiciones realizado con EDS. En éstas micrografías puede evidenciarse la morfología acicular del silicio.

Además, se muestra la distribución del silicio, en color rojo, en las diferentes zonas de la aleación, evidenciando que éste se concentra en el constituyente eutéctico. En este mapeo de composición no se encontraron elementos contaminantes producto del proceso de fusión. En el análisis microestructural se hizo la medición de la variación del tamaño de las dendritas de oro con la disminución del porcentaje de silicio de las aleaciones, esta es presentada en la figura 5, en la cual se muestra que a medida que se disminuye el contenido de silicio en las aleaciones se aumenta el tamaño de la dendrita de fase Au.

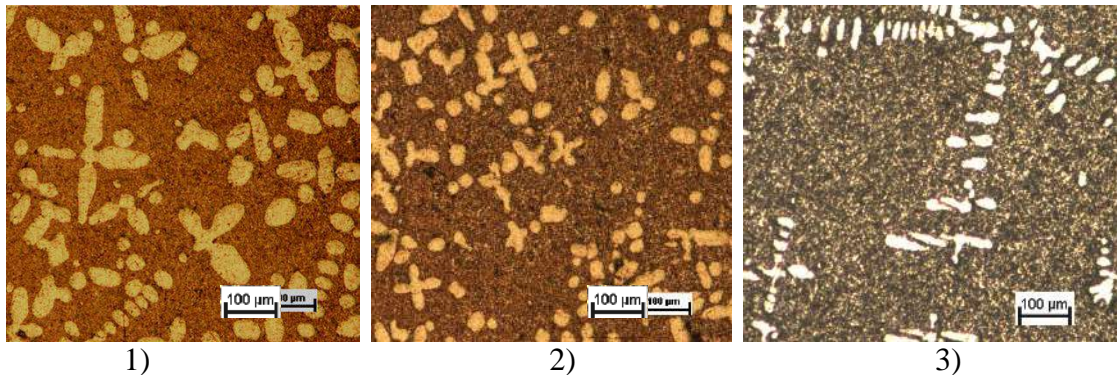


Figura 3. Micrografías por microscopía óptica para las muestras 1) 2.5%Si, 2) 2.8%Si y 3) 3%Si.

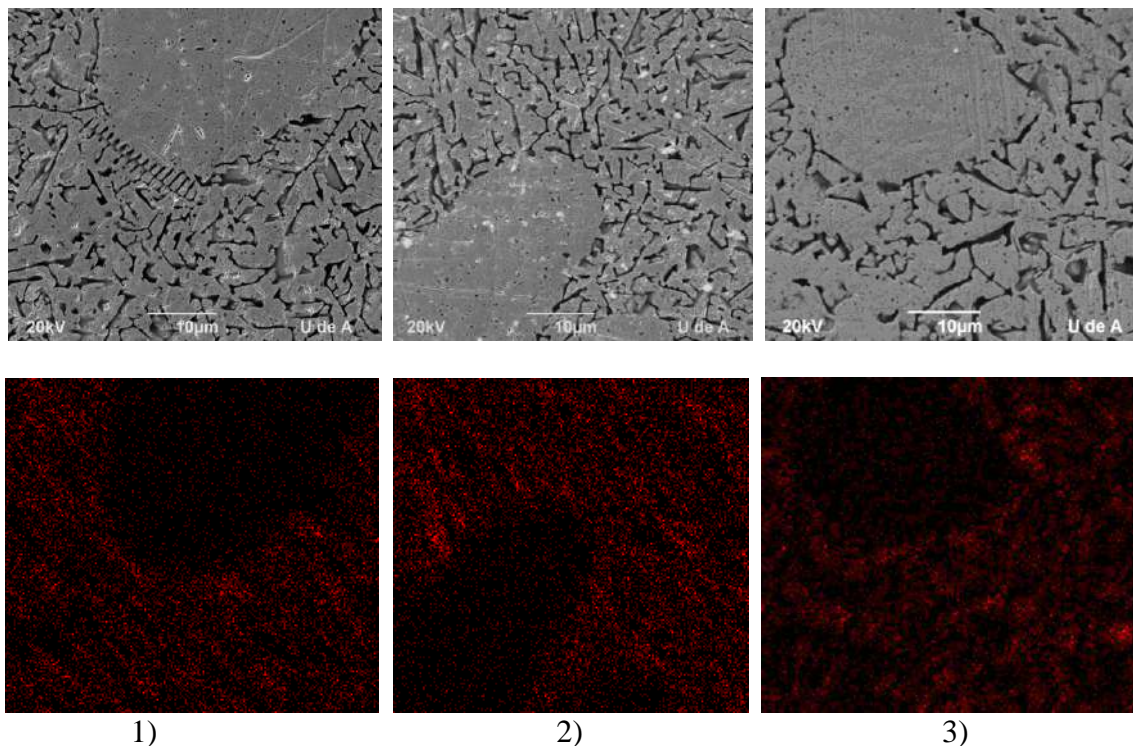


Figura 4. Comparación de las micrografías SEM y de la distribución del silicio según las fases presentes 1) 2.5 %Si, 2) 2.8%Si y 3) 3%Si.

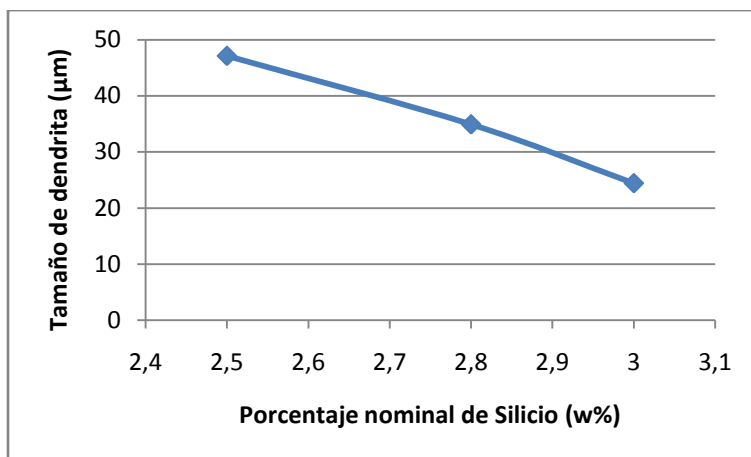


Figura 5. Tamaño de dendrita en función del porcentaje nominal de Silicio.

Análisis de composición en las dendritas y en el constituyente eutéctico se realizaron mediante espectrometría de dispersión de longitud de onda (WDS). Estos se representan en la figura 6, en la cual se muestra como se distribuye el silicio. En la región dendrítica se pudo determinar presencia de silicio a medida que aumentaba el porcentaje nominal del mismo, debido a que el frente de solidificación de la fase oro, que no disuelve el silicio, alcanza a atrapar partículas. Además, estas mediciones permiten evidenciar que realmente en el constituyente eutéctico obtenido la concentración de silicio es mayor a la eutéctica de equilibrio, lo que puede ser consecuencia del proceso de enfriamiento después de la solidificación, el cual realmente no ocurrió en condiciones de equilibrio, pero tiene un régimen de enfriamiento lento, permitiendo que los precipitados de silicio en el eutéctico crecieran, aumentando la concentración de este. Además, a medida que aumenta el porcentaje de silicio en la aleación, este se precipita en las dendritas, disminuyendo su concentración en el eutéctico.

En la figura 7 se muestra la variación de la densidad de la aleación con la variación del porcentaje nominal de silicio. Debe decirse en primer lugar, que hay una notable disminución en la densidad con respecto a la densidad del oro puro. Esto se explica por la baja densidad relativa del silicio que es de 2.33. Es importante aclarar que en estas aleaciones Au-Si, que se aproximan a alta ley por su alto tenor de Au, ya no sería válido utilizar el criterio de densidad relativa para determinar la ley de la aleación. Pues como se tiene establecido, la ley de las aleaciones está determinada por el porcentaje de oro [1].

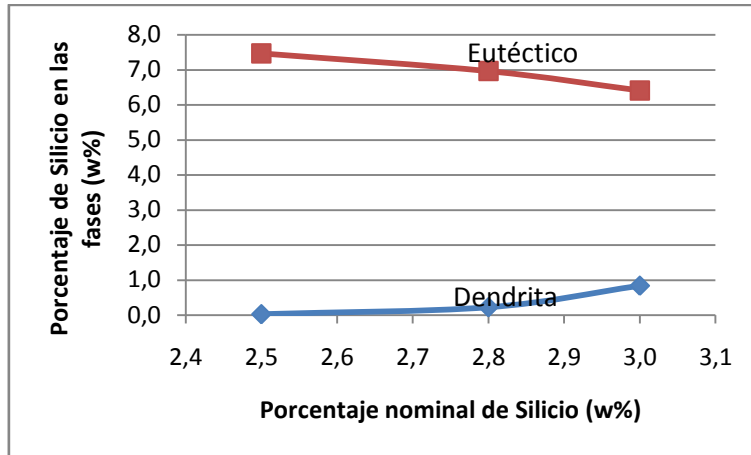


Figura 6. Variación del contenido de Silicio en la fase eutética y dendrítica según el porcentaje nominal de silicio

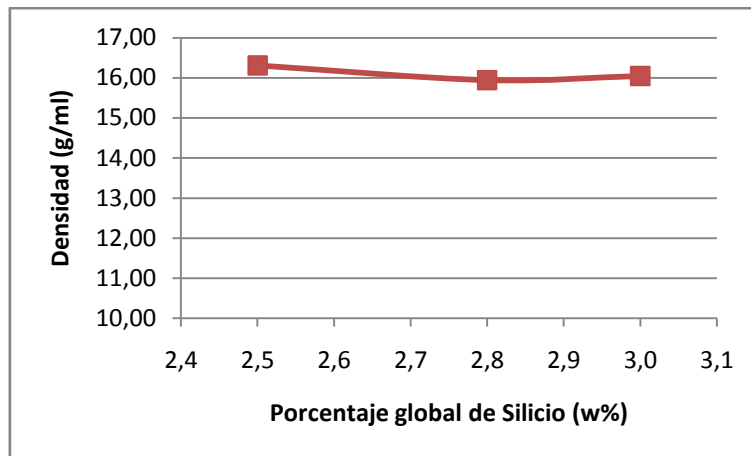


Figura 7. Densidad en función del porcentaje global de Silicio.

En la figura 8 se tiene los resultados de microdureza tomados tanto para la fase dendrítica como para el constituyente eutético, de la cual se puede ver que en la fase dendrítica que tiene poco contenido de silicio es más blanda que la zona eutética. Si se considera por separado cada una de las fases de las diferentes aleaciones se observa que en la zona dendrítica se da un aumento en la microdureza debido al enriquecimiento en silicio como se mostró en la figura 6. Como se dijo antes, el silicio no es disuelto por el oro pero los resultados muestran que se presenta un atrapamiento durante la solidificación de la fase dendrítica, generándose un aumento en el endurecimiento por la presencia de los precipitados de silicio. El reporte de la microdureza Vickers en la región eutética es afectado directamente por la distribución de los precipitados de silicio donde la microdureza mas alta se dio en la aleación con 2,8% de silicio debió a que presenta una mejor distribución de los precipitados de silicio como se logra ver en la figura 4.

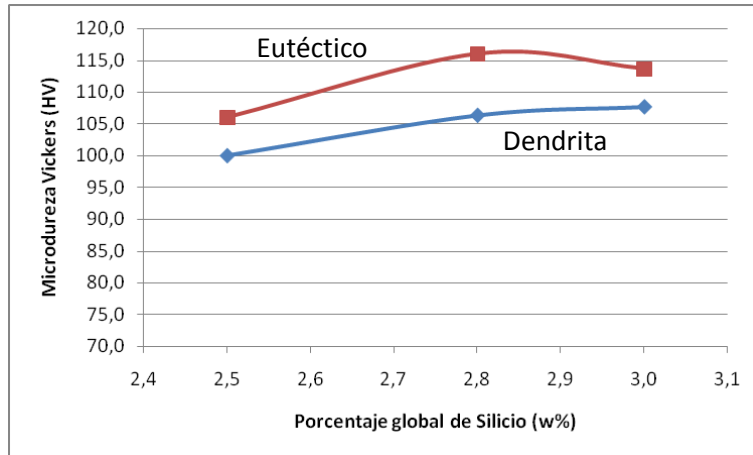


Figura 8. Microdureza en función del porcentaje global de Silicio.

Para el ensayo de color, los resultados muestran una importante similitud de las aleaciones Au-Si con las aleaciones de 22 quilates Au-Ag-Cu y se acercan al color del oro puro. De la figura 9 se puede apreciar la fuerte cercanía de la aleación Au-3%Si y una desviación hacia el color rojo de las muestras Au-2.8%Si y Au-2.5%Si, aunque los valores del Yellowness Index (YI), calculados según las normas ASTM D1925 y ASTM E313, permiten concluir que los valores de color se encuentran muy cercanos al color de las aleaciones de 22 quilates tradicionales. Los resultados de los índices de color YI se muestran en la tabla 2, el cual se constituye en una prueba importante en la medición del color en la industria de la joyería [9].

Tabla 2. Resultados de los índices de color YI para las muestras de Au-Si comparadas comparativamente con valores del oro puro y de aleaciones de 22 quilates tradicionales.

Aleación	YI D1925	YI E313
Au refinado	70,46	53,93
Au-3%Si	63,71	48,67
Au-2,8%Si	61,89	48,06
Au-2,5%Si	63,71	48,67
Au-22 quilates	63,45	46,80



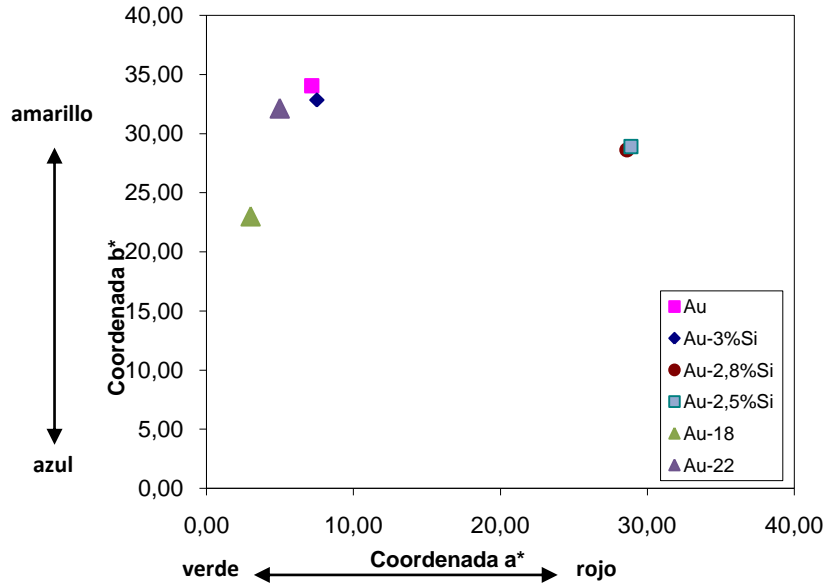


Figura 9. Coordenadas de color CIELab para las muestras de Au-Si comparadas con oro puro, y aleaciones de 18 y 22 quilates tradicionales.

## Conclusiones

La metalografía de las aleaciones oro-silicio ha sido poco estudiada y ofrece una importante oportunidad de poder aplicar su bajo punto de fusión en los procesos de soldadura.

Los resultados de esta investigación revelan desviaciones de la aleación con respecto al comportamiento teórico esperado, se cree que se debió a la desviación del equilibrio en la velocidad de solidificación. Se requiere analizar más al detalle esta desviación del comportamiento eutéctico como una posibilidad de la aplicación comercial de la aleación.

Los ensayos de microdurezas mostraron una tendencia importante en el endurecimiento de las aleaciones con el contenido de silicio, y aun más en la región eutéctica se tienen los mayores valores de microdureza dado que esta es la zona donde el silicio se concentra en mayor cantidad en forma de precipitados aciculares.

Los resultados del color de revelan que las aleaciones Au-Si presentan valores similares a las aleaciones de 22 quilates tradicionales dado por los índices YI, que son en general el termino de comparación de color más aplicado en la industria de la joyería.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo dado por el CODI y el Fondo de Innovación Tecnológica, de la Universidad de Antioquia, por la financiación de este trabajo.

## Referencias Bibliográficas

- [1] A.S. Mc Donald, G.H. Sistare. The metallurgy of some carat gold jewellery alloys. Gold Bulletin, 1978. p. 66-73.
- [2] Gafner, G. "The development of 990 gold – titanium: its production, use and properties". Gold Bulletin. 22 (4), 1989.
- [3] Sánchez H. Fabricación y caracterización de la aleación Au – 1.7% Ti para aplicaciones odontológicas. Universidad de Antioquia Medellín, 2006
- [4] Medina A. R. Fabricación Y Caracterización De Prototipos De Joyería En La Aleación Au -1.7% Ti Obtenidos Por Microfusión A La Cera Perdida En Horno De Plasma. Universidad de Antioquia. Medellín. 2008.
- [5] G, Humpston y D,M, Jacobson. Do 18 Carat Gold Solders Exist. Gold Bull.1994
- [6] R.S Jackson. An improved 9 carat yellow gold casting alloy. Gold Bulletin, n 3,Vol 11. 1978. P 88-93.
- [7] G. Gusmanoa, R. Montanarib, G. Montesperellic , M.E. Tatab, E. Bemporadd, M. Valente, S. Kaciulis , G. Mattogno. Influence of Si, Ni and Co additions on gold alloy for investment cast process. Journal of Alloys and Compounds 325 (2001) 252–258.
- [8] Alguacil, E.J. El Refino del Oro. Revista Metallurgia. Vol 31; No. 3 (1995); p. 182-191.
- [9] Henderson, S. y Manchanda, D. White Gold Alloys: Colour Measurement and Grading. En: Gold Bulletin. Vol. 38; No. 2 (2005); p. 55-67.