

00522
12



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

Caracterización No Destructiva de Bronces
Prehispánicos Mayas Mediante PIXE

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO
P R E S E N T A :
ARTURO MORALES MARTINEZ



MEXICO, D. F.



EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUÍMICA

2003



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

Presidente Prof. **GUILLERMO F. SALAS BANUET**

Vocal Prof. **ARTURO ALEJANDRO SANCHEZ SANTIAGO**

Secretario Prof. **JOSE LUIS RUVALCABA SIL**

1er sup. Prof. **JOSE GUADALUPE RAMIREZ VIEYRA**

2do. Sup. Prof. **BALBINA OJEDA RAMIREZ**

Sitio en donde se desarrolló el tema:

Laboratorio Acelerador Peletrón, Instituto de Física, UNAM.

Asesor del Tema:



JOSE LUIS RUVALCABA SIL

Nombre del Sustentante



ARTURO MORALES MARTÍNEZ

A Paty, Sarita y Anita

Porque son la fuerza que me impulsa a continuar.

A Alejandro Morales:

Gracias por todo.

A José Luis Ruvalcaba Sil:

Por el apoyo recibido.

Agradecimientos:

A la Universidad Nacional Autónoma de México

A la Facultad de Química y a todos mis maestros que me dieron clases.

A mi asesor, Dr. José Luis Ruvalcaba Sil, por sus invaluables sugerencias y por que gracias a él fue posible llevar a buen término esta tesis.

A mis sinodales:

Prof. Guillermo F. Salas Banuet

Prof. Arturo Alejandro Sánchez Santiago

Prof. José Guadalupe Ramírez Vieyra

Profra. Balbina Ojeda Ramírez

Por sus valiosas aportaciones a este trabajo.

Al Instituto de Física de la UNAM por el gran apoyo recibido.

A los proyectos J32159-U Y G0010-E por el apoyo en el funcionamiento del dispositivo de haz externo y del Acelerador Peletrón.

A los señores Karim López Guzmán y Francisco Jaimes Beristain por su valiosa ayuda para el manejo del acelerador Peletrón durante las mediciones con el Haz externo.

A los maestros Carlos Álvarez y Lynne Lowe del Centro de Estudios Mayas del Instituto de investigaciones Filológicas de la UNAM quienes prestaron las piezas de la colección para su análisis.

Al profesor Marcos Pérez Fuentes que gracias a su desinteresada ayuda en cuestiones de cómputo, me facilitó en gran medida el trabajo.

Al profesor Constantino González Ledezma por las facilidades otorgadas para la realización de los trámites respectivos.

INDICE

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1. Metalurgia prehispánica mesoamericana del cobre y sus aleaciones	
1.1 Origenes	9
1.2 Características de la metalurgia mesoamericana	13
1.2.1 Aleaciones	19
1.3 El desarrollo de la metalurgia	22
1.4 Las diferentes etapas de la metalurgia de Occidente	25
1.4.1 Propiedades y significado de las aleaciones	27
1.4.2 Uso de aleaciones y fabricación de artefactos	30
1.4.3 Técnicas de manufactura	30
1.4.3.i Técnicas en frío	31
1.4.3.ii Técnicas por calentamiento	33
1.4.3.iii Técnicas de fundición	33
1.4.3.iv Técnicas de cabado	37
CAPÍTULO 2. La Técnica PIXE	
2.1 Introducción	39
2.2 Fundamentos de PIXE	41
2.3 Análisis cualitativo mediante PIXE	49
2.4 Análisis cuantitativo mediante PIXE	51
2.5 El dispositivo de haz externo	54
2.6 Antecedentes de las Aplicaciones de PIXE al Estudio de Aleaciones Metálicas Arqueológicas (oro-bronce)	57
CAPÍTULO 3. Análisis de bronce Mayas	
3.1 Contexto Arqueológico	60
3.2 Descripción de las muestras	63
3.3 Dispositivo experimental	66
3.4 Metodología	68
3.5 Resultados del análisis por PIXE	71

3.6 Discusión de resultados de acuerdo al tipo de pieza y a la probable región de procedencia	72
-CONCLUSIONES	78
-COMENTARIOS FINALES	79
-REFERENCIAS	80
-APÉNDICE 1	83
-APÉNDICE 2	101
-APÉNDICE 3	113

TITULO:
CARACTERIZACIÓN NO DESTRUCTIVA DE BRONCES
PREHISPÁNICOS MAYAS MEDIANTE PIXE

INTRODUCCIÓN

El estudio de la metalurgia prehispánica, en lo particular en lo que concierne al desarrollo de aleaciones de cobre, es aún una cuestión no resuelta que requiere un mayor número de investigaciones. Existen diversos puntos de vista respecto al uso de cobre nativo y de aleaciones con arsénico y estaño con fines tecnológicos y culturales pero en realidad, existen pocos estudios analíticos sobre piezas prehispánicas, sobre todo en lo que respecta a piezas que no proceden del occidente de México.

El trabajo de tesis que se presenta contribuye al estudio de las aleaciones de cobre y de su composición con el análisis de una colección de piezas de bronce Mayas descubierta en Chiapas y que corresponde a un sitio del periodo de contacto, momento en el cual la metalurgia se encuentra bien desarrollada en Mesoamérica. A partir de los resultados de este trabajo se pretende determinar el tipo de aleaciones presentes y sus características metalúrgicas en una región donde existen pocas investigaciones previas sobre la composición de los metales y sus aleaciones, en lo particular en lo que respecta al problema del uso del plomo.

Debido a que se trata de materiales arqueológicos se requieren utilizar técnicas analíticas muy sensibles y no destructivas, en el sentido que no es necesario tomar muestras de las piezas. También es deseable que los métodos utilizados permitan realizar un número importante de análisis en un corto tiempo. Por lo anterior y con el propósito de alcanzar el objetivo de este trabajo, se ha propuesto el uso de la técnica Emisión de Rayos X Inducida por Partículas (PIXE), la cual está dotada de estas características. Cuando se irradia un material empleando un haz de protones de algunos MeV de energía es factible ionizar los átomos y producir como consecuencia la emisión de rayos X característicos de los átomos presentes en el material bajo estudio. Este es el principio de la técnica PIXE. Para los fines de este trabajo se utiliza un sistema de haz externo, con lo cual la irradiación de las

piezas puede realizarse prácticamente en cualquier región de éstas a la atmósfera. Un material de referencia certificado se irradia bajo las mismas condiciones que las piezas de bronce para llevar a cabo el análisis cuantitativo y determinar los elementos mayoritarios y trazas de la aleación. Los análisis se realizaron en el laboratorio Peletrón del Instituto de Física de la UNAM. Esta información es fundamental para establecer los tipos de aleaciones de las piezas Mayas y su tecnología metalúrgica así como para obtener información sobre la metalurgia prehispánica del bronce en esta región y de sus contactos con otras regiones de Mesoamérica.

El trabajo de tesis se ha organizado en tres capítulos, el primer capítulo explica el contexto histórico en el cual hace su aparición la metalurgia, cuales son sus características, su desarrollo, sus diferentes etapas y su significado.

El capítulo 2, está relacionado con las bases teóricas de la técnica PIXE, los antecedentes y aplicaciones al estudio de aleaciones metálicas arqueológicas, en este capítulo también se describen los fundamentos de los análisis cuantitativo y cualitativo de esta técnica.

En el capítulo 3 se describen las piezas encontradas en "las Margaritas", su contexto arqueológico, el dispositivo experimental, la metodología de análisis, así como los resultados.

Posteriormente se presentan las conclusiones a las que se llegan luego de analizar los resultados obtenidos del método PIXE tanto como por los análisis cualitativos como por los cuantitativos.

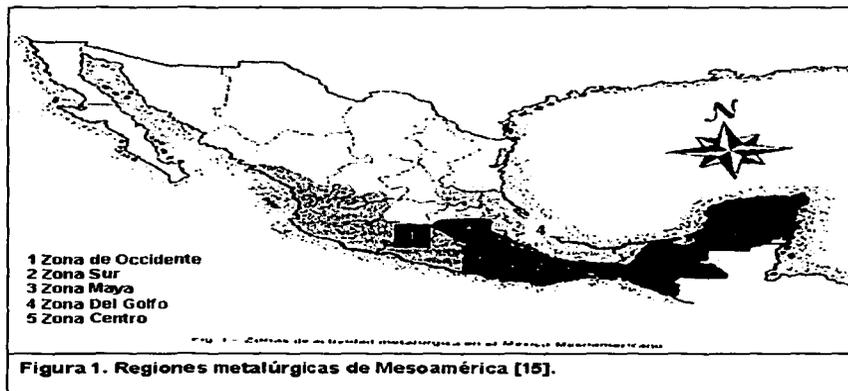
Finalmente se anexan 3 apéndices los cuales contienen las fotos de las piezas arqueológicas analizadas, las tablas que presentan los resultados obtenidos e información recopilada en la bibliografía sobre piezas de bronce prehispánicas y los diagramas ternarios que establecen las relaciones entre las piezas y las regiones de procedencia.

CAPÍTULO 1

Metalurgia prehispánica mesoamericana del cobre y sus aleaciones.

1.1 Orígenes.

Diversas son las teorías acerca de la aparición de los metales en la región cultural conocida como Mesoamérica (figura 1). Por la época en que surgen los primeros artefactos de metal, el dominio de Teotihuacan y de los centros mayas clásicos en el Petén ya había entrado en plena decadencia. Los impresionantes logros tecnológicos de estos pueblos mesoamericanos se habían alcanzado sin el empleo de metales, con tecnologías donde utilizaban el hueso, la piedra, la arcilla y otros materiales [1]. Según las tradiciones indígenas, una leyenda nativa antigua consideraba que los toltecas introdujeron el uso de los metales a México, sin embargo no se ha recuperado ningún objeto metálico de Tula, el principal centro Tolteca, lo que contradice esta posibilidad [2].



Por una parte existe una teoría donde se considera que la metalurgia del México prehispánico parece haber hecho su aparición durante principios del

periodo posclásico (alrededor de 900 D.C.) [3]. Según esta, la orfebrería prehispánica de México podría considerarse como el resultado de la difusión, hacia el norte, de la orfebrería colombiana, propagación verificada por vía terrestre a través de la región ístmica centroamericana, en el que las áreas correspondientes a las actuales repúblicas de Panamá y Costa Rica lograron un florecimiento extraordinario. Según esta teoría, la metalurgia mexicana surgió completamente desarrollada, o al menos en etapas avanzadas de desarrollo. Esta actividad se caracterizó por el uso del oro, así como del cobre en estado nativos.

Otras investigaciones concluyen además que la metalurgia peruana completamente desarrollada y reforzada por la técnica colombiana fue introducida, repentinamente por mar alrededor de 715 A.C. La aparición en México de cerámica, espejos, mosaicos de turquesa y objetos de oro y plata con características peruanas y elaboradas por los años 700 a. c. refuerzan esta hipótesis [2]. Según esta teoría los metales fueron desconocidos en Centroamérica hasta el fin del gran periodo Maya 700 D. C. Por lo tanto, se cree que los pueblos peruanos emplearon los metales al menos unos mil años antes que los Mayas y los Mexicas.

Por otra parte, los datos de hallazgos de objetos metalúrgicos, no permiten identificar un punto único de introducción de los metales a Mesoamérica. Una teoría sugiere que la aparición de la metalurgia más antigua ocurrió en dos áreas considerablemente separadas. Los resultados de estudios de los artefactos metálicos provenientes de Amapa, Nayarit, así como otros de Apatzingán, Michoacán, indican que los artefactos de metal aparecieron en la costa Oeste de México en una fecha cercana a los años 900 D.C. y pocos años después se convirtió en un gran centro metalúrgico, productor de una gran variedad de objetos metálicos. Más o menos por el mismo tiempo los metales irrumpieron en el área sur Maya, es probable que se haya dado una introducción simultánea al Occidente de México y al sur Maya por medio de comercio marítimo lo que sugiere que, ambas áreas funcionaron como centros de difusión de artefactos metálicos [4].

A este respecto, se propone que existió una conexión entre Sudamérica y el área Maya [5]. Este hecho se encuentra reforzado por la observación

realizada por Colón, que reportó en 1502, una canoa de comerciantes indígenas que incluía algodón, cacao, y objetos de metal como cascabeles, hachas y crisoles para fundición de cobre. Se argumenta que los objetos aparecieron esporádicamente a través de la zona Maya durante el Clásico tardío. Los discos metálicos aparecidos en el Soconusco indican que el centro de producción metalúrgico fue establecido en la frontera norte Maya antes de terminar el Clásico aunque Bray considera que las evidencias son circunstanciales [5].

Por otra parte D. Hosler, especialista en las tecnologías metalúrgicas de las culturas en América, publicó lo siguiente:

“La metalurgia se desarrolló entre los años 600 y 800 D.C. en el Occidente de México, en una región denominada como zona metalúrgica mexicana de Occidente. Aunque algunas de las técnicas que caracterizan a la metalurgia mexicana fueron tomadas de otras más antiguas – de las de Colombia (vaciado) y de las de Perú y Ecuador (trabajado en frío) – los metalurgistas del occidente, además de incorporarlas a su trabajo, las transformaron de acuerdo a la realidad social del Occidente mexicano, así como a la disponibilidad de minerales y de metales nativos. La tecnología metalúrgica del México antiguo, que en gran parte se extinguió a causa de la conquista española, fue una de las más variadas e imaginativas de las metalurgias del mundo preindustrial” [6].

Los primeros indicios en México del uso del metal provienen de sitios arqueológicos de la costa occidental: de la región del río Balsas, de Tomatlán, Jalisco y de Amapa, Nayarit. En esa época, los metales no eran conocidos en el resto de Mesoamérica. Se considera que la metalurgia tuvo un gran desarrollo en el Occidente debido a que en Michoacán, Jalisco y Nayarit abundan el cobre la plata y otros minerales metálicos.

Existe una gran similitud entre la metalurgia del Occidente y las metalurgias sudamericanas en cuanto a las clases de objetos que producían, a sus técnicas de fabricación, a su diseño y a su uso. Esto sólo se puede explicar por la introducción desde Sudamérica al Occidente de elementos significativos de esas tecnologías. Existen evidencias que tienden a demostrar que esa introducción fue efectuada por vía marítima, como ya se explicó anteriormente, ya que no se han recuperado objetos hechos de metal en la zona entre Nicaragua y Oaxaca durante este periodo, lo cual

indica que la metalurgia no se difundió al norte por tierra. El contacto que resultó en la importación de esta tecnología fue directo, y probablemente entre Ecuador y la costa del Occidente de México. Cuando se habla del ingreso de esta tecnología sudamericana a Mesoamérica se refiere a que se transmitió conocimiento sudamericano de las técnicas de fabricación de un conjunto de objetos que comprende cascabeles, argollas, agujas y pinzas; y además conocimiento de técnicas de fundición que permitía fundir el metal directo de su mineral. Posteriormente estos conocimientos incluyeron los métodos requeridos para producir las aleaciones de bronce. Existen también evidencias de que algunos artefactos sudamericanos llegaron a las costas del Occidente mesoamericano como objetos de intercambio. Estos artículos sirvieron como prototipos y fueron copiados por los orfebres mesoamericanos. Una relación del siglo XVI la de Salomón de Jeréz, describe el encuentro de navegantes europeos con una balsa de los Manteño originarios de Ecuador y que eran grandes navegantes y comerciantes marítimos, que viajaban a lo largo de las costas del pacífico de Sudamérica. La relación describe ciertos objetos de metal que llevaban estos viajeros en sus balsas, y entre ellos había cintas, pinzas, y cascabeles de metal. El documento relata que los marinos ecuatorianos llevaban tales objetos para intercambiarlos por la concha *Spondylus* que habita las tibas aguas ecuatoriales desde el norte del golfo de Guayaquil hasta el golfo de California, estas conchas eran utilizadas por los antiguos ecuatorianos para sus ceremonias [7].

Estudios recientes utilizando el método PIXE, analizando cascabeles y Minerales provenientes de Paquimé un sitio cercano a Casas Grandes, Chihuahua en el Norte de México, soportan la hipótesis de que un centro metalúrgico fue localizado en este sitio durante la fase "Paquimé" del periodo Medio 1224 – 1473 [8]. También se estableció una estrecha relación con la zona metalúrgica del Occidente, ya que se rescataron algunos cascabeles con análisis similares a cascabeles provenientes de Chalchihuites en el noroeste de México.

De acuerdo a las teorías anteriormente descritas, se puede llegar a las siguientes consideraciones:

1. La metalurgia surgió en México por los años 600 a 800 D.C., es decir, por la época en que la civilización Maya y Teotihuacana entraban en plena decadencia.
2. La introducción de la metalurgia se llevó a cabo por medio de comercio marítimo, y se desarrolló en al menos dos zonas separadas, una de ellas conocida como el Occidente de México, que comprende a Jalisco, Michoacán y Nayarit. Por esta época en la zona Maya se verificó esta introducción de la metalurgia, en la región que comprende Chiapas, Yucatán, Quintana Roo, Campeche y más al sur hasta Honduras.
3. Los conocimientos de la metalurgia y artículos como cascabeles, hachas, anillos, argollas, cinceles, agujas y otros, fueron importados de Sudamérica, de regiones donde se había desarrollado la metalurgia, al menos unos 1000 años antes que en Mesoamérica. Estos objetos elaborados en regiones de Colombia, Perú, y Ecuador, sirvieron como prototipos los cuales fueron copiados y transformados por los metalurgistas mesoamericanos
4. Otros centros metalúrgicos productores de artefactos pudieron ser establecidos en otras regiones de Mesoamérica.

1.2 Características de la metalurgia mesoamericana.

Diversos análisis de laboratorio realizados sobre una muestra de 3,200 artefactos de cobre, muestran que si bien la tecnología se basaba en el trabajo con el cobre, los orfebres de Occidente usaban casi todos los recursos minerales disponibles en esa rica región minera; además del cobre utilizaban plata, plomo, oro, estaño, así como sus diferentes aleaciones. Entre éstas están los bronzes cobre-estaño y cobre-arsénico, se desarrollaron métodos de fundición muy complejos y muy elaborados para extraer estos metales de sus minerales y producir sus aleaciones. Solamente un porcentaje reducido de objetos fabricados de cobre o sus aleaciones se destinó al uso práctico [2]. La mayoría de estos objetos se utilizaron como ornamentos, que indicaban una posición de élite y de poder

sociopolítico [6]. Por otra parte, el Occidente contenía los más variados yacimientos minerales disponibles para los antiguos metalurgistas mesoamericanos, incluyendo carbonatos y sulfuros de cobre; Arsenopirita (FeAsS), Argentita (Ag_2S), y sales sulfurosas de plata; la Casiterita (SnO_2), un óxido de estaño, se presenta en una extensión sur-occidental de la provincia estannífera de Zacatecas. La figura 2, muestra la ubicación de algunas minas prehispánicas Mesoamericanas [7].

En una investigación realizada por Grinberg [9] y después del estudio del lienzo de Jucutácato, (fig- 3) se realizó una temporada de campo, buscando las minas prehispánicas de Churumuco, Michoacán, que se encuentran sobre la ladera oriental del cerro de Mayapito, sobre el río Balsas. Esta expedición arrojó los siguientes resultados:

- i. Se encontraron 4 minas (dos de ellas se encuentran derrumbadas) cuyo tamaño no es superior a los 15 m de largo por 2 m de ancho.
- ii. Las únicas evidencias de herramientas encontradas fueron mazos de piedra y una gran piedra de diorita, utilizada para la molienda del mineral.
- iii. En una porción de terreno donde se supone se hallaba el taller de fundición se encontraron diversos restos de escorias con glóbulos de cobre; escorias semifundidas con trozos de carbón, cal, hematita y malaquita; escorias muy vítreas, sin restos de minerales y con agujeros de refusión.

Las evidencias arqueológicas encontradas nos dan una idea del tipo de instrumentos con que se contaba para el trabajo de extracción y de fundición del metal. Probablemente este modelo de extracción y fundición fue un patrón en la región.



Uno de los mayores retos para el estudio de la metalurgia es determinar los yacimientos de los minerales, los métodos basados en el análisis de isótopos estables ha sido utilizado para este fin. La proporción de isótopos permanece constante durante el procesamiento del metal.

Por ejemplo en un estudio de isótopos de plomo realizados en piezas mesoamericanas [10], se exponen los resultados de el análisis de isótopos para identificar las fuentes de metal usadas para la elaboración de los instrumentos de cobre y sus aleaciones, y comparando sus proporciones de isótopos de plomo con las de los depósitos minerales muestreados en las regiones mesoamericanas indicadas, se puede determinar el lugar de procedencia de la pieza.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



El resultado de diversos estudios señala que eran varios los metales que conocían los antiguos metalúrgicos.

Oro: El oro fue uno de los metales más utilizados en la orfebrería prehispánica, obteniéndose al estado nativo mediante el lavado de las arenas auríferas, ya sea en polvo o en granos. Los antiguos mexicanos denominaban al oro *teocuitlatl*, o sea, excremento divino. En los códices y grabados en piedra, el color amarillo indica que se trata de piezas de oro. El oro constituía uno de los más importantes tributos de varios pueblos sojuzgados por los Mexicas. Según el código Mendocino tributaban el oro en polvo, en forma de tejuelos del tamaño de una hostia, en forma de láminas, de bezotes y de narigueras [2]. En la figura 4, se presenta un *teocuitlapitzqui*, orfebre y en el brasero, el símbolo del oro [3].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Plata: Fue obtenida en México por minería, como fue hecho en Perú y en Chile. Las minas han sido identificadas en Pachuca, Hidalgo y cerca de Río Grande en Tepic y otras cerca de Taxco [3].

El nombre de la plata en Náhuatl era *ixtacteocuitatl*, o sea oro blanco o excremento divino blanco. Parece que se le consideraba como una variedad del oro y no como un metal distinto [2].

Los orfebres del Occidente de México también utilizaban mucho la plata, tanto el metal puro como la aleación cobre-plata. En toda la región abunda la plata pura y depósitos de mineral de plata, la mayor parte de los cuales contienen azufre. En muchos de los casos se encuentran junto con los minerales de cobre.

Cobre: Los objetos de cobre son muy abundantes, sobre todo los de uso práctico. El nombre Náhuatl que lo designaba era *tepuz* y en el código Mendocino se le representa con un hacha.

El cobre abunda en toda el área de Occidente, tanto puro como en formas minerales. El primero es relativamente fácil de trabajar puede ser martillado

para ir dándole forma, sin tener que calentarlo o puede ser calentado y fundido antes de moldearlo. La fundición del metal a partir del mineral de cobre es, sin embargo, más compleja. El mineral tiene que ser primero triturado y luego calentado; si la mena es un óxido, se calienta con carbón en un horno o crisol, como el que aparece representado en la relación de Michoacán [11]. Los fundidores de metal recibían el nombre de **tepuzpitzqui** (fig. 5). La temperatura tiene que ser suficientemente alta para que el metal se funda, lo que en el caso del cobre equivale un poco más de 1,000 °C. Las temperaturas de hasta 950 °C, se pueden obtener en hogueras abiertas de modo que con ayuda de sopletes esa temperatura puede alcanzarse sin dificultad. Si la mena es un sulfuro, el proceso se vuelve más difícil. A los minerales sulfurados antes que nada hay que quitarles el azufre mediante calcinación. Para calcinar la mena primero se tritura y luego se extiende sobre una superficie plana encima de una hoguera, para que quede expuesta a un máximo de oxígeno. La mena se calienta a una temperatura que elimine el azufre volviéndolo dióxido de azufre. El mineral restante queda convertido así en óxidos y puede fundirse en un crisol [10].

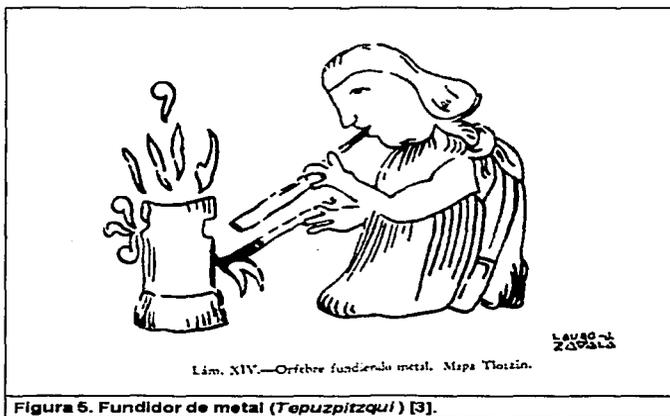


Figura 5. Fundidor de metal (*Tepuzpitzqui*) [3].

Plomo: Minerales de plomo fueron encontrados en muchos lugares en México y Centro América, usualmente como galena o en combinación con plata. El plomo nativo es recurrente en la vertiente del Pacífico de Guatemala donde se han encontrado pepitas de plomo de 60-80 gramos, en el arenilla. Una pepita de plomo fue encontrada en el fondo del Cenote Sagrado de Chichen Itzá [3].

Estaño: Este es relativamente escaso en México. Las regiones más productivas están en Guanajuato y San Luis Potosí. Hernán Cortés que necesitaba estaño para fundir un nuevo cañón, escribió que les encontró a los nativos del distrito de Taxco pequeñas piezas de estaño muy delgadas y en forma de monedas.

El estaño es tan escaso en México que no se había extraído comercialmente. De hecho la casiterita (SnO_2), no se encuentra en el Occidente de México pero sí se ubica en pequeñas vetas en la región central del Norte del país [1].

1.2.1 Aleaciones.

El uso de las aleaciones es característico de las regiones donde el arte de la metalurgia esta altamente desarrollado. Para que una aleación sea valiosa debe tener alguna cualidad no poseída por los metales individuales que han sido combinados, como puede ser la dureza o un punto de fusión más bajo. En México los nativos elaboraban diferentes tipos de aleaciones.

Oro-cobre (Tumbaga): La aleación conocida como "Tumbaga" es esencialmente una mezcla de cobre-oro pero contiene plata como impureza. La facilidad para fundir, el color, y la dureza pudieron ser deseables para los nativos, pero su gran ventaja es que es muy práctico. El oro funde a los $1,063\text{ }^\circ\text{C}$ y el cobre a los $1,083\text{ }^\circ\text{C}$ pero, cuando ambas menas son combinadas en un porcentaje del 10% al 40%, el punto de fusión es disminuido por unos $100\text{ }^\circ\text{C}$. La aleación es eutéctica con 18% de cobre y 82% de oro, cuando es calentada a $878\text{ }^\circ\text{C}$. La tumbaga fue manufacturada desde el sureño Perú hacia México y las Antillas [3].

Bronces (Cobre-Arsénico y Cobre-Estaño):- Los orfebres usaban profusamente el bronce, tanto en la aleación de cobre-arsénico como de cobre estaño. El bronce de cobre-arsénico se obtenía fundiendo la pirita arsenical, una mena de sulfuro de arsénico que abunda en el Occidente, y la calcopirita, una mena de sulfuro de cobre. El uso generalizado de la aleación de bronce cobre-estaño era limitado ya que el estaño es poco común en México. El estaño es soluble en cobre hasta un 10%. En este punto el estaño endurece al cobre y hace a este más fácil de fundir y reduce la porosidad. Aleaciones con el 10% de estaño tienen la máxima expansión al enfriarse y consecuentemente favorecen la fundición. Hay un aumento en la brillantez cuando se incrementa la dureza. Por eso el 7-8% de estaño es el límite para el trabajado del metal a menos de que un recocido especial sea empleado [3].

De los objetos con bajo contenido de estaño, entre el 2 y 5%, suficiente para obtener dureza y ductilidad se mencionan hachas, cinceles, agujas, platos, bezotes, alfileres, alambres. A pesar de ser un metal escaso en México los objetos que se fabricaban en mayor cantidad son los cascabeles de paredes delgadas y finos diseños elaborados por el método de la cera perdida. Las pinzas se elaboraban de cobre-estaño (12%), cobre-arsénico, cobre-arsénico-estaño. Con el cobre-arsénico se realizaban "hachas-moneda" que tienen su equivalencia en Sudamérica [12].

En una segunda etapa se fabricaron cascabeles con altos contenidos de estaño que llegan a concentraciones cercanas al 25% de Sn, en dichas proporciones el metal se torna dorado [7].

De evidencias provenientes de la región andina y con base en diversos estudios realizados en hallazgos arqueológicos, se propuso considerar bronce arsenical a aquellas aleaciones con contenidos mayores a 0.5 % de arsénico, punto en el cual las cualidades físicas del material se hacen notorias. En las piezas encontradas en esa región se observa una composición aproximadamente constante y una proporción adecuada de arsénico, que desde el punto de vista metalúrgico apoyan la hipótesis de que el arsénico fue utilizado intencionalmente y su contenido en las

aleaciones controlado. Esto demuestra que los antiguos metalurgistas sabían las ventajas que ofrecía el arsénico al alearse con el cobre, tales como resistencia, dureza, maleabilidad, y facilidad para el fundido, además de que aprendieron a integrarlo al proceso de fundición evitando que éste se volatilice por completo [13-14-15].

Según Grinberg y Franco [16], las piezas provenientes de la zona Maya tienen de todos los elementos, principalmente arsénico en pequeñas cantidades, las autoras anteriores sostienen que:

“Las piezas metálicas encontradas en Toniná Chiapas, no puede decirse que sean objetos muy elaborados pero sí son todos artefactos típicamente mayas, teniendo en cuenta el menor grado de desarrollo metalúrgico de los mayas, estos artículos son muy buenos exponentes de la metalurgia Maya, no es accidental que las piezas de metal sean, en su gran mayoría, de cobre elaboradas por fundición y conteniendo arsénico en pequeñas cantidades”[16].

Aleación Cobre-Estaño-Plomo y Cobre-Arsénico-Plomo: Análisis de artefactos de cobre provenientes de distintas regiones de México de los cuales se disponen también análisis químicos arrojan que, las piezas provenientes del Valle de México tienen, casi siempre, plomo, estaño o sin hierro. Entre los tipos de objetos encontrados se encuentran cascabeles los cuales contienen porcentajes de plomo que van desde 0.1% hasta el 19%, dichos cascabeles se encontraron en localidades como Azcapotzalco, Distrito Federal, Calixtlahuaca y el Valle de México entre otras [16].

Se cree que los antiguos metalúrgicos agregaron plomo deliberadamente, por que se considera que ayuda a incrementar la fluidez del metal fundido, además de facilitar la fundición tanto del bronce como del cobre. Sin embargo con experimentos de fundición de cascabeles, se logró demostrar que la adición de plomo no facilita la producción de objetos fundidos delgados como indican algunos textos metalúrgicos, y por el contrario se destaca la gran importancia del diseño de los moldes, temperaturas de fundición y aleaciones utilizadas [17].

Aleación cobre-plata. Los orfebres también utilizaban mucho la plata, tanto la aleación cobre-plata como la plata nativa de alta pureza. En toda la región abunda la plata pura y depósitos de mineral de plata, la mayor parte de los cuales contienen azufre. En muchos de los casos se encuentran junto con los minerales de cobre [2].

1.3 .- El desarrollo de la metalurgia.

Al estudiar las culturas metalúrgicas de Centro y Sudamérica, donde se había utilizado el metal por lo menos unos mil años antes de que hiciese su aparición en el Occidente de México. En Perú, Ecuador y Bolivia ya existía la metalurgia por el año 500 A.C.; las primeras muestras son incluso de mucho antes, de aproximadamente el año 1,500 A.C. en la región andina. La metalurgia de esta zona se caracteriza por la abierta preferencia de moldear los metales martillándolos para darles forma y por un gusto particular del color. Estos pueblos andinos usaban el oro la plata y el cobre para fabricar productos suntuarios enriqueciendo la superficie para que parecieran dorados y plateados. Usaban el bronce para hacer herramientas, agujas, punzones, hachas, azadas y puntas para excavar.

En el sur de Centroamérica y Colombia surgió una tradición metalúrgica diferente. Los artículos son hechos de cobre-oro, la mayor parte de los objetos son artículos suntuarios como petos, figurines, máscaras y vasijas, la mayoría de los cuales se lograron fundiéndolos por el método de la cera perdida, ya que se usaba en la región por el año 200 D.C. Una comparación detallada de las tecnologías de Centro y Sudamérica con el primer período de la metalurgia del Occidente de México (entre el año 700 y 1,200 A.C.) muestra una semejanza más pronunciada con la metalurgia del Ecuador.

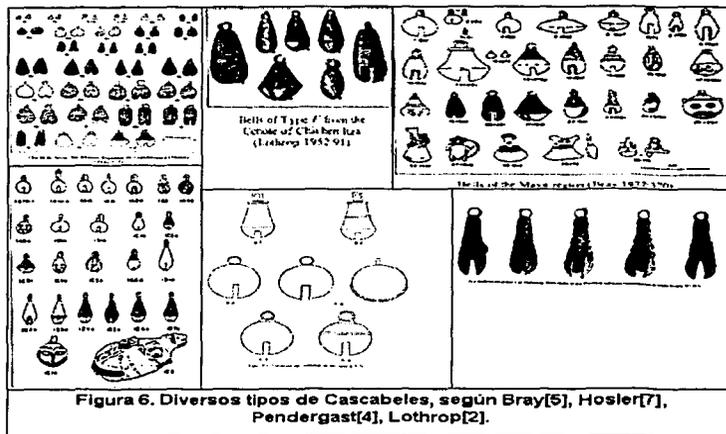
Durante una primera etapa de la metalurgia del Occidente, los orfebres del México antiguo utilizaban el cobre para hacer cascabeles (campanas), pinzas, agujas, aros y objetos como hachas y punzones. En el sur de Ecuador los orfebres hacían el mismo tipo de objetos, con iguales características de diseño y mediante las mismas técnicas de fabricación, inclusive en cada caso, los artículos ecuatorianos son anteriores a sus

contrapartes mexicanos. Entre los artefactos más comunes se encuentran los siguientes:

Aros abiertos.- Son hechos de cobre, en Ecuador estos objetos son igualmente comunes y también están hechos de cobre, pero aparecen varios cientos de años antes. En las dos regiones fueron realizados exactamente de la misma manera: martillando en frío una varilla de metal fundido y luego arqueándola hasta formar un aro abierto. Su entorno arqueológico es también similar en las dos regiones: los aros aparecen en entierros y se colocaban de modo tal que parecían una especie de adorno para el cabello.

Agujas de coser.- Son otro tipo de objetos que vinculan a ambas regiones. Los orfebres elaboraban varios tipos, que se distinguen por la forma de ojo. En este período temprano las agujas eran de cobre y el ojo se hacía punzándolas o perforándolas. Este instrumento aparece en Ecuador varios cientos de años antes, con las mismas características que las mesoamericanas.

Pinzas .- Tanto en el Occidente de México como en Ecuador abundaban también las pinzas de cobre martillado en frío, con un diseño de barra y con unas aspas que de perfil son planas; este instrumento aparece en Ecuador varios cientos de años antes.



Cascabeles.- Los cascabeles fundidos a la cera perdida constituyen un artefacto muy importante en el Occidente mexicano de esa época (Fig. 6) En Ecuador, los cascabeles eran también comunes pero se fabricaron martillándolos para darles forma, en lugar de fundirlas. Es en Centroamérica donde se hallan los equivalentes más parecidos a los cascabeles mesoamericanos. Allí se les dejaban las paredes lisas y el método usado para su fabricación era el de la cera perdida. Por lo general, se usaba una aleación de oro y cobre. En la costa ecuatoriana también se conocieron antes las hachas, los punzones, los anzuelos y otros objetos de cobre típicos del primer período en la región occidental mexicana.

El aspecto más significativo y notable de estos hallazgos es que la mayoría de los artefactos del periodo temprano encontrados en el Occidente de México, aparecen en otras partes del país y las características particulares del diseño, así como las técnicas y materiales de fabricación, son idénticas a las otras áreas. Cada una de las características técnicas que distingue a la metalurgia del Occidente Mexicano no sólo aparece antes en otras partes de América, sino que se asocia con los mismos elementos técnicos con los

que se encuentra en el sur de Centroamérica, Colombia, y Ecuador. Lo que llama todavía más la atención es que la distribución de estos elementos tecnológicos es discontinua: se manifiestan en la metalurgia del Occidente Mexicano y en las dos áreas culturales metalúrgicas al sur, pero no se encuentran en las áreas intermedias.

1.4 –Las diferentes etapas de la metalurgia de Occidente.

D. Hosler con base en el tipo de metal trabajado, propuso un modelo en donde sostiene que la metalurgia del cobre se desarrolló en la región de Occidente en dos grandes periodos [7]. Aunque la existencia de otros focos de desarrollo metalúrgico no se consideran en esta propuesta, sólo un mayor número de investigaciones permitiría determinar si es factible extenderla a otras áreas de Mesoamérica.

Periodo 1 (600-800 a 1200 D. C.)

Los artefactos metálicos mesoamericanos más antiguos se han descubierto en sitios de la costa: en Amapa (Nayarit), en Tomatlán (Jalisco) y en la región del infiernillo (en las riberas del río balsas entre Michoacán y Guerrero). Hay discusión acerca de las fechas, pero en todo caso, estas se sitúan alrededor del año 700 de nuestra. Los datos de laboratorio indican que en el periodo 1 de la metalurgia del cobre en Occidente, es decir, entre el 600 y el 1,200, los orfebres de esta región trabajaban principalmente el cobre, aunque a veces se encuentran fragmentos de lámina de oro y de plata. Entre los objetos de fecha más antigua se han hallado cascabeles hechos a la cera perdida. Los cascabeles son los artefactos metálicos más abundantes en Mesoamérica. La microestructura de los cascabeles, que consiste en cristales que no han sufrido deformación (figura 7b), y es característica de un objeto que se ha vaciado en molde para darle forma. Por documentos históricos y datos arqueológicos, se sabe que los cascabeles se usaban principalmente en ritos y danzas. Los miembros de la elite los llevaban puestos y eran tributos de las deidades [7].

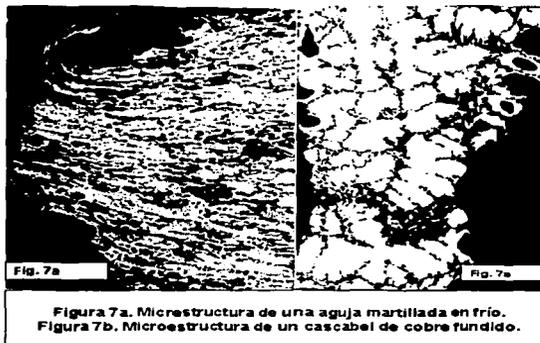


Figura 7a. Microestructura de una aguja martillada en frío.
Figura 7b. Microestructura de un cascabel de cobre fundido.

Según Hosler [6], los artesanos mesoamericanos no estuvieron interesados en utilizar los metales con propósitos utilitarios, aunque en ocasiones lo hicieran; más bien, les importaban los metales por su resonancia y sonoridad, es decir, con fines de uso para las élites y los funcionarios religiosos.

En los mismos contextos arqueológicos en donde se han hallado cascabeles se han encontrado objetos que se fabricaron martillándolos en frío. La mayoría son utensilios, pero también hay objetos suntuarios. Todos están hechos de cobre. Entre otros, se encuentran muchas agujas de coser. El diseño que caracteriza al periodo anterior al año 1,200 A.C. tiene el ojo perforado. Estas agujas se manufacturaron doblando el metal por el eje longitudinal, lo que resulta en una fisura interna. Después martillaban la punta, la aplanaban y hacían la perforación empleando un cincel. En estos contextos también aparecen argollas, cuyo diámetro es de alrededor de unos 2 cm, también se fabricaron doblando el metal por el eje longitudinal y luego se martillaron para darles su forma circular. Se les ha recuperado en entierros, donde yacían sobre los cráneos de los esqueletos. Estas argollas se sostenían con tela y se usaban para sujetar el cabello.

También se han recuperado pinzas de las excavaciones, las cuales se usaban para la depilación. Hay piezas hechas de metal y de otros materiales en toda América. Se sabe por referencias históricas y datos etnográficos, que se usaban para depilar las barbas. Otros utensilios - también martillados en frío- comunes durante el primer periodo son las hachas y los cinceles, las hachas servían entre otros usos para cortar madera y otras como hachas- moneda.

El aspecto que más llama la atención es que desde el principio se encuentran objetos hechos por dos métodos conceptualmente muy diferentes: unos hechos vaciados a la cera perdida; otros dándole forma martillándolos. Aunque todos los objetos fueron hechos de cobre, su composición química y las micro estructuras indican que unos se hacían de cobre nativo, otros, de minerales de cobre fundido. La fundición es un proceso complejo: requiere control cuidadoso de temperaturas y de otras variables, y sólo se encuentra el empleo de ese método donde hay amplio conocimiento y experiencia técnica.

Periodo 2 (A partir de 1200 D.C.)

Alrededor de 1200 D.C. ocurrieron cambios fundamentales en la metalurgia del Occidente de México. Algunos se debieron probablemente a los contactos que proseguían con Sudamérica. Otros se deben al genio técnico de los metalúrgicos mesoamericanos y a las circunstancias o condiciones sociales locales. El cambio más representativo es que se comenzó a trabajar en las aleaciones de cobre; especialmente en la de cobre-plata y los dos bronce: el cobre-arsénico y cobre estaño. Aprovecharon las propiedades de esas aleaciones para mejorar el diseño y la función de los mismos objetos que habían hecho anteriormente de cobre.

Dentro del periodo 2 de la metalurgia Mesoamericana se pueden clasificar los objetos elaborados por su significado y por su uso.

1.4.1. -Propiedades y significado de las aleaciones.

Aunque la metalurgia durante el segundo periodo seguía centrando su interés principalmente en hacer cascabeles, su enfoque se ampliaba. Las

propiedades de los bronce permiten vaciar cascabeles más grandes y delgados, con diseños más complejos que sus equivalentes en cobre. Las aleaciones de bronce se funden a temperaturas más bajas que el cobre nativo. Además se solidifican en un intervalo de temperaturas y no a una sola, lo que permite que el metal líquido fluya por el molde y que llene los detalles de los moldes. Asimismo los bronce son más fuertes y resistentes que el cobre puro, lo cual facilita y explica el hecho de que podían producir cascabeles más grandes y delgados. La concentración de estaño o de arsénico en estos cascabeles varía entre el 7 y el 25 %. Cuando está presente el arsénico en concentraciones tan altas, por ejemplo en un 18 %, el metal se torna plateado. Cuando el estaño aparece en concentraciones altas el metal adquiere un color dorado. Es notorio que los artesanos agregaban estaño o arsénico en concentraciones mucho más altas de lo necesario para realizar los diseños lo cual lleva a la conclusión de que buscaban intencionalmente los colores dorados y plateados que resultaban al agregar estos metales [7]. No obstante, la proporción de cascabeles con esta característica es pequeña.

La propuesta de Hosler considera que además de alterar el color del metal, el uso de los bronce facilitaba la producción de cascabeles más grandes y con formas variadas. Propone que esto implicaba el intervalo de tonos que podían producir los cascabeles. En esos cascabeles, el tono es función del volumen interior de la cámara de resonancia y el tamaño de la abertura de la base. Uno de los alcances técnicos más notables de la metalurgia de Occidente era producir colores dorados y plateados pero no usaban el oro ni la plata para alcanzar sus objetivos. Los experimentos indican que técnicamente era muy difícil: para realizar estos diseños y para la función se necesitaba las propiedades del bronce; su solidificación, su fluidez, su dureza y su resistencia. Si el orfebre quería vaciar un cascabel grande, delgado, y con elementos complejos que también se viera dorado y plateado, su única solución era usar un bronce [7].

El mineral más común de arsénico en Mesoamérica, la Arsenopirita (o Mispickel, FeAsS ; $\text{As}=46\%$; $\text{S}=19.7\%$; $\text{Fe}=34.3\%$) se encuentra asociado con minerales de cobre en muchos yacimientos en el Occidente de

mesoamérica y son poco comunes los minerales de cobre que llevan arsénico, como la Enargita ($3\text{Cu}_2\text{S}\cdot\text{As}_2\text{S}_5$; As=32.6%; S=19.1%; Cu=48.3%) y la Tenantita ($3\text{Cu}_2\text{SAsS}_3$). Se puede obtener la aleación cobre-arsénico mediante la fundición directa de aquellos minerales. En los Andes se fundieron minerales como la Enargita directamente para producir esta aleación. También fundieron conjuntamente minerales de Arsenopirita con minerales de cobre. Por lo tanto, los contactos entre los antiguos mexicanos y los artesanos de Sudamérica pudieron haber resultado en el aprendizaje de las técnicas para fundir estos minerales. El interés en los colores dorados y plateados tiene un origen centro y sudamericano, estos colores se asociaban con lo sobrenatural en muchas regiones de América, entre ellas Mesoamérica. El poder que es inherente a los tonos de los cascabeles también determinó la trayectoria de la metalurgia Mesoamericana. Según Hosler los sonidos desempeñan un papel central en los ritos de fertilidad agrícola y humana, la lluvia, el agua, las tormentas y la vegetación son símbolos de fecundidad. Los sonidos de los cascabeles evocan a los truenos y a la lluvia, y también imita a los sonidos de la víbora de cascabel y el rugido del jaguar.

Los tonos de los cascabeles también son fundamentales en la creación en el jardín sagrado de los mexicas, el cual se crea por el canto y el canto se representa por el sonido de los cascabeles, los cantos de los pájaros y el tono de la voz humana que canta. La raíz Nahuatl significa "sonido claro". También significa algo que suena como un cascabel o una persona que habla bien. En Tarasco **Tzilic**, significa "metal", "cascabel", y "sonar un cascabel". Los sonidos de los cascabeles crean la fertilidad humana y agrícola, crean el orden y protegen. La importancia de los cascabeles no sólo se manifiesta en su abundancia y variedad, sino que se expresa también en el idioma.

La premisa de que el metal es divino, no destructible y poderoso probablemente resultó en una serie de decisiones técnicas que dieron forma a la metalurgia mesoamericana. El interés en los cascabeles proviene del poder creativo de sus sonidos, de los colores metálicos, de sus asociaciones con las deidades solares y lunares, y posiblemente de la

asociación del proceso de aleación con conceptos de fertilidad y reproducción [7].

1.4.2.-Usos de aleaciones y fabricación de artefactos.

Los metalúrgicos del Occidente de México también aprovechaban las propiedades de los bronce para variar y mejorar el diseño de las pinzas y las argollas. Las pinzas que corresponden al periodo 2, contienen al estaño en proporciones entre el 8 y el 12%. Estas pinzas son convexas, además de ser más anchas, largas y finas que las pinzas de cobre del periodo 1 (fig. 8). Muchas de estas pinzas se trabajaron en caliente, porque cuando la concentración de estaño sobrepasa el 5 % se vuelven frágiles al martillarlas. Se sabe que estos utensilios funcionan muy bien como instrumentos depilatorios, pero que fallan cuando están hechos de cobre. Pero para que la pinza funcione, la concentración de estaño tiene que ser más elevada de lo necesario. Esto indica que agregaban el estaño en altas concentraciones con la intención de producir un color dorado. En el Occidente de México las pinzas llegaron a tener una función simbólica además de la práctica. A veces son muy grandes: Miden más de 10 cm de largo. Hay documentos en que se muestra a sacerdotes michoacanos que las llevaban puestas como símbolo del estado y del poder religioso. Se modificó también el diseño de las argollas fabricadas de bronce de cobre – estaño. Sus diámetros son más grandes y el grosor es menor que las argollas del periodo 1. Esos cambios de diseño reflejan la dureza y la resistencia que caracteriza a los bronce. El estaño también aparece en concentraciones que llegan hasta el 20%.

1.4.3 Técnicas de manufactura.

Las técnicas metalúrgicas que dominaban los antiguos mesoamericanos se dividen en cuatro grupos: Técnicas en frío, técnicas por calentamiento, técnicas de fundición y técnicas de Acabado.

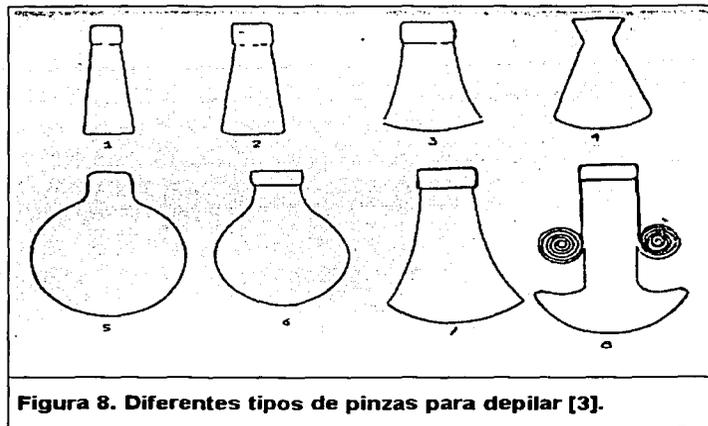


Figura 8. Diferentes tipos de pinzas para depilar [3].

1.4.3 i) Técnicas en frío [3].

Martillado.-El más primitivo tipo de trabajado metalúrgico es el martillado de objetos para darles forma a partir de pepitas de metal nativo. En algunas partes de Perú, el martillado es la única técnica y el oro era el único metal utilizado. Sahagún describe que esto también es aplicado en México y que los fundidores y los martilladores eran verdaderos artistas. En México había un grupo de orfebres que se dedicaba a trabajar el metal exclusivamente por martillado, Esta técnica se realizaba por medios muy sencillos, empleando piedras planas. Sahagún al hablar de los martilladores, dice que "su oficio consiste solamente en adelgazar el oro con una piedra y de la manera conveniente".

Laminado.- Es ésta una técnica muy antigua, quizás la primera usada en América por quienes comenzaron a emplear los metales. En México ocupa un lugar de primera importancia, algunos objetos se fabricaron de oro trabajado mecánicamente que es sinónimo de oro laminado, por lo general se empleó en el forrado de objetos fabricados de otros materiales como la

madera. Las láminas eran gruesas cuando se trataba de fabricar instrumentos como coas y hachuelas; de mediano espesor, del grueso de un pergamino, como dicen las fuentes escritas, cuando se destinaron a objetos como bandas, frontales, diademas, anillos abiertos, brazaletes; muy delgadas cuando eran para forrar objetos, especialmente objetos de madera tallada.

Repujado.- Se aplicaba a las láminas delgadas. En México se utilizó tanto el repujado por presión como el logrado por percusión. Las formas más comunes son las rayas o puntos, tal vez obtenidos por medio de punzones u otros materiales duros.

Templado (endurecimiento).- Usando procedimientos especiales, algunos metales pueden ser fácilmente endurecidos, ofreciendo así mayor resistencia y un menor desgaste. En México se aplicó especialmente a los objetos de agricultura, pues por las coas y azadas de cobre de la región tarasca se tiene que este endurecimiento fue muy usado. El procedimiento que los indios empleaban para lograr el endurecimiento no era otro que el martillado. En lo que respecta a las coas y azadas, el martillado se empleó no sólo para darles la forma, sino también para endurecerlas y evitar que se desgastaran fácilmente.

Tumbado.-En México parece haber tenido poco empleo el procedimiento mediante el cual una lámina se lograba convertir en un objeto semiesférico, por golpes sucesivos propinados con un instrumento de superficie convexa. Sólo se conocen pocos objetos logrados por esta técnica.

Argollas.- Gran admiración causó a lo cronistas y conquistadores la habilidad de los indios para fabricar figurillas y objetos de partes articuladas, como los bezotes de oro provistos de lengua móvil. La unión por medio de argollas parece haber sido la más frecuentemente usada. Las argollas son de falso alambre, pero para evitar que se abrieran fueron soldadas en su abertura.

1.4.3.ii) Técnicas por calentamiento [3].

Recocido.- El recocido, operación mediante la cual un objeto previamente templado por martillado vuelve a su dureza inicial, parece haberse empleado bastante en México no hay duda que muchas de las piezas de cobre, cuya forma se lograba después de habérselas sometido a un prolongado martillado, para que no se rajaran tuvieron que someterse a fuego varias veces en el curso del trabajo. Este procedimiento debe haberse aplicado principalmente a objetos hechos de láminas martilladas.

Fabricación de alambres.- Según los cronistas, el alambre fue un elemento muy usado en México, aunque en muchos casos la mención de objetos con "hilos" de oro, bien puede corresponder a los de falso alambre. Es muy posible que los alambres se hayan fabricado de pequeños lingotes convertidos en barras cilíndricas, eliminando los bordes por medio de piedras planas usadas a manera de martillos. Tal vez con posterioridad se les haya sometido a un trabajado mecánico entre dos superficies planas. Una molienda continua con 2 piedras, aplicada a la pieza de metal, la habría hecho reventar, por lo que los orfebres se vieron en la necesidad de someterla varias veces al calentamiento. A los alambres muy delgados tal vez se les haya aplicado un trejilado, teniendo cuidado de someterlos al fuego varias veces durante la operación. En México se empleó el alambre en la fabricación de agujas, alfileres, anzuelos, anillos y adornos.

1.4.3.iii) Técnicas de fundición [3].

Fundición con soplete.- El procedimiento de fundición de metales que más se empleó en México, consistió en el uso de un hornillo en que la temperatura se elevaba mediante unos sopletes largos y del cual tenemos citas tanto escritas como pictográficas. De los indios de la costa del Golfo, se dice que " lo fundían en unas cazuelas donde quiera que lo hallaban, y para fundirlo les servían de fuelles unos cañutos de caña, con los que encendían el fuego; y así lo vimos hacer en nuestra presencia". En ninguna

de las representaciones de los códices se aprecia algún objeto de cazuela que pudiera servir como crisol.

Una importante representación de un orfebre (**teocuitlapitzqui**), usando un brasero, la tenemos en el códice Mendocino (fig. 5). En una mano tiene un tubo, con el que sopla sobre un cajete trípode, y en la otra una vara. Sobre el cajete se encuentra el símbolo del oro, del que salen llamas y volutas de humo. En la relación de Michoacán y en el lienzo de Jucutácato podemos ver representaciones de orfebres tarascos en acción (fig. 9), si bien el hornillo del citado lienzo parece tener bastante influencia europea. Dos tipos de braceros más evolucionados son los del Códice Florentino y el mapa Tlotzin. El hornillo del Códice es una especie de olla con paredes perforadas, para permitir mayor afluencia de aire e introducir el soplete. En diversas partes de México se han encontrado braceros muy parecidos. El que aparece en el mapa Tlotzin es mucho más evolucionado, pues es un hornillo de barro, ligeramente cónico, con la parte más reducida hacia arriba. La base está perforada con un anillo y en las paredes se encuentran dos aberturas laterales de las que salen llamas y volutas de humo, lo mismo que de la parte superior. En este brasero funde metal un personaje (fundidor de metal **tepuzpitzqui**) (fig. 5) que en una mano tiene un soplete, con el que posiblemente arroja aire al interior del hornillo, y en la otra una vara dirigida también hacia la abertura mayor. Según estas representaciones, los sopletes parecen haber tenido entre cincuenta y sesenta centímetros de longitud, siendo más ancho en la parte inferior y disminuyendo hacia la extremidad que se colocaba en la boca.

Vaciado en molde abierto.- Tal vez utilizando el procedimiento del molde abierto se haya obtenido la mayor parte de los objetos sin ornamento como las coas, azadas, hachas y cinceles. Se conoce un molde de barro, que posiblemente se haya utilizado para vaciar hachas y que en la actualidad pertenece al Museo de Morelia. El material de fabricación debió ser la arcilla arenosa, principalmente con granos de cuarzo, para resistir altas temperaturas sin quebrarse o agrietarse.

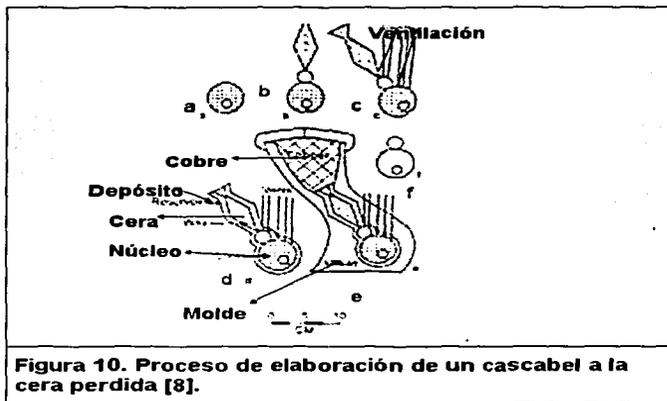


Figura 9. Orfebres tarascos en acción [3].

Vaciado en moldes cerrados o de la cera perdida.- Este procedimiento fue el más empleado para obtener la mayor parte de las piezas de metal que conocemos. La habilidad con que lo manejaron fue extraordinaria, pues aún hoy en día, con los recursos de la técnica moderna es bastante difícil la fabricación de piezas de esta clase. En esta técnica la cera era de abejas, la cual no se empleaba tal como se recogía sino después de purificarla y clarificarla, añadiéndole copal blanco para darle una consistencia especial. El objeto que se deseaba fabricar se tallaba en una masa de arcilla mezclada con carbón molido previamente preparado. Este núcleo se cubría con una delgada lámina de cera de la que también se le ponían las partes ornamentales. La lámina de cera se cubría con carbón molido y, por último, con una envoltura de barro con carbón molido, aunque éste no tan fino como el del núcleo. La capa de cera tenía comunicación con el exterior por medio de unos rodillos hechos del mismo material. Al calentar el molde, la cera se derretía, dejando un espacio vacío que después se rellenaba con el metal fundido. Quebrado el molde se obtenía el objeto deseado. Es muy posible que cuando el núcleo quedaba completamente aislado en el molde,

en el momento apropiado se hayan servido de ciertos objetos muy pequeños con el fin de mantenerlo en la misma posición aún después de escurrir la cera (fig. 10)

Los datos arqueológicos, de laboratorio, estudios de la composición química y de la micro estructura de artefactos (fig. 7a) indican que si bien los metalurgistas del Occidente en ocasiones utilizaban el cobre nativo, la mayoría de los objetos se fabricaron con el metal fundido de minerales metálicos.



Falso alambre ("falsa filigrana").- En la mayoría de los cascabeles de la región de Michoacán, el núcleo no se cubría con láminas de cera sino que previamente se hacían hilos de este material y se enrollaban convenientemente. Algunos de estos ejemplares tienen los hilos tan uniformes que hacen pensar en el posible empleo de hilos de algodón, previamente sumergidos en cera, y que al colocarse los moldes al fuego la

cera sale y el algodón se quema, sacándose las cenizas de su interior. El uso de hilos de cera no se limitó a los cascabeles, pues en otros lugares de México se emplearon para hacer objetos de índole muy distinta. Muchas de estas piezas fabricadas de este falso alambre se han considerado erróneamente como de filigrana.

1.4.3.iv) Técnicas de acabado [3].

Pulido.- Con exclusión de los objetos de uso práctico, el resto de los objetos de metal recibía el pulido como toque final. Sahagún lo describe " Una vez terminada la joya se le pulía con una piedra y se le sumergía en un baño de alumbre. Se supone que se usó arena muy fina, especialmente con granos de sílice.

Forrado o Chapeado.- Los orfebres mesoesmericanos hicieron un uso ilimitado del forrado, o recubrimiento total o parcial de un objeto, así como del chapeado o recubrimiento de pequeñas partes mediante láminas de metal. Las láminas eran de plata y principalmente de oro. Los objetos eran de madera, de cuero, y de piedra. Ignorando los procedimientos empleados para realizar este trabajo, es posible que para mantener unidas ambas superficies se hayan empleado ciertas sustancias adhesivas. Se dice que esta sustancia era un betún llamado *Tzacolli*, que en castellano corresponde a engrudo, pero no se sabe cuáles eran las sustancias de que este engrudo se componía. Tal vez en muchos casos las láminas se ajustaron a las hendiduras o detalles de la pieza por medios puramente mecánicos .

Incrustación y Embutido.- Estos dos medios decorativos son muy semejantes. En el incrustado es necesario ajustar un material extraño en una pequeña cavidad practicada en la superficie que se va a adornar. En el embutido el material decorativo se hunde por presión en la superficie del objeto por decorar. Se hace mención con frecuencia de objetos de metal

con incrustaciones, siendo las piedras preciosas y semi-preciosas como la obsidiana, el material incrustado con más frecuencia.

Dorado por oxidación (Mise Couleur).- A diferencia de Sudamérica, ningún documento histórico en Mesoamérica se menciona un procedimiento por el cual, mediante el empleo de jugos de plantas, se lograba eliminar parcialmente el cobre de la superficie de un objeto fabricado de aleación de oro y cobre para darle la apariencia de oro puro. De una manera muy vaga Sahagún se refiere a una especie de coloración. " Por segunda vez se le pone al fuego y se la calienta en él, y cuando sale del fuego, se le baña por segunda vez y se le embadurna con un unguento de oro, que se compone de tierra fangosa mezclada con un poco de sal, con lo que el oro se pone hermoso y muy amarillo" .

Este procedimiento de dorado perfeccionado por los indios del Perú, hace que un objeto que sólo esta compuesto parcialmente de oro tenga una apariencia de oro puro. El procedimiento consiste en: un calentamiento del metal; un baño en una solución ácida suave, parecida a la salmuera; un nuevo tratamiento con una pasta ácida algo más corrosiva; y finalmente, pulimentado. Todo ello extrae, es decir, disuelve de la superficie los elementos que no son de oro: primero el cobre luego la plata. El producto acabado presenta una delgada superficie de oro [18].

CAPITULO 2

La Técnica PIXE.

2.1.-Introducción.

La técnica Emisión de Rayos X Inducida por partículas (PIXE) es una de las más versátiles de todas las técnicas de origen nuclear. Sus aplicaciones además de la arqueología y fuera de la ciencia de materiales se relacionan con la biología, la geología y la contaminación ambiental, por ejemplo. Estas áreas revisten un particular interés debido al tipo de materiales y procesos asociados a un problema de arqueología e historia. Por cuestiones ligadas al sistema de detección de los rayos X, en general con PIXE sólo es posible el análisis de los elementos de número atómico superior a once (sodio); no obstante, la sensibilidad de la técnica alcanza algunos $\mu\text{g/g}$ (ppm). Asimismo, en ciertos casos es posible llevar a cabo un perfil de la composición elemental de los metales.

La técnica PIXE es un método rápido y preciso para el análisis elemental de objetos arqueológicos e históricos. Usando haces de protones cuya energía es del orden de 3 MeV, y un sistema de haz externo es posible obtener en pocos minutos, la composición de regiones pequeñas de los artefactos, sin necesidad de realizar un muestreo y sin causarles daño alguno. Con sistemas apropiados, esto puede analizarse incluso a un nivel microscópico. Debe recordarse que cuando se aplica a piezas únicas arqueológicas, los métodos analíticos requieren sobre todo ser no-destructivos y ser capaces de dar la composición química de diferentes partes del artefacto sin necesidad de llevar a cabo un muestreo.

Debido a lo anterior mediante la técnica PIXE se han estudiado con éxito dentro de los contextos arqueológico y artístico, aspectos tales como tecnologías antiguas, autenticidad, origen y procedencia, relación entre pueblos, áreas de influencia y de comercio, datación y cronologías, así como la elección de métodos apropiados de conservación y de restauración [19].

Para llevar a cabo este procedimiento se requiere de un acelerador de partículas para producir un haz de iones. Las partículas del haz son generadas en la fuente de iones del acelerador (fig. 11), para luego ser aceleradas y enfocadas para producir un haz o rayo de partículas, el cual es conducido a través de una línea al vacío hasta una cámara donde el objeto en estudio se irradia, o bien a través de una ventana delgada para llevar a cabo el análisis del objeto a la atmósfera. La respuesta del material a la irradiación es detectada y procesada para obtener el espectro respectivo.

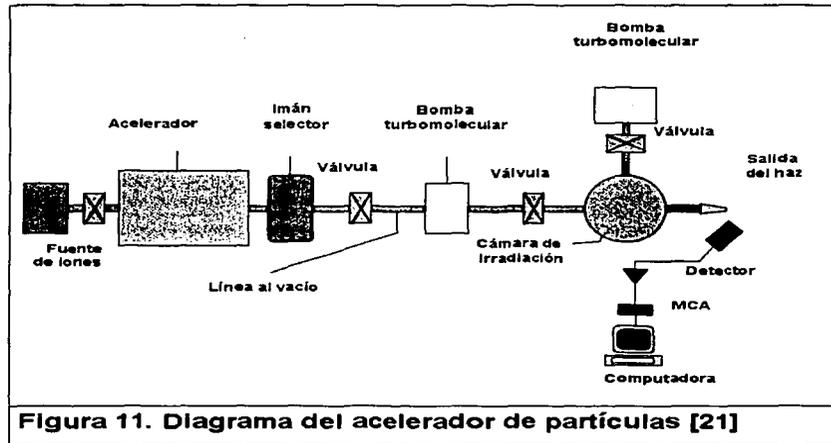


Figura 11. Diagrama del acelerador de partículas [21]

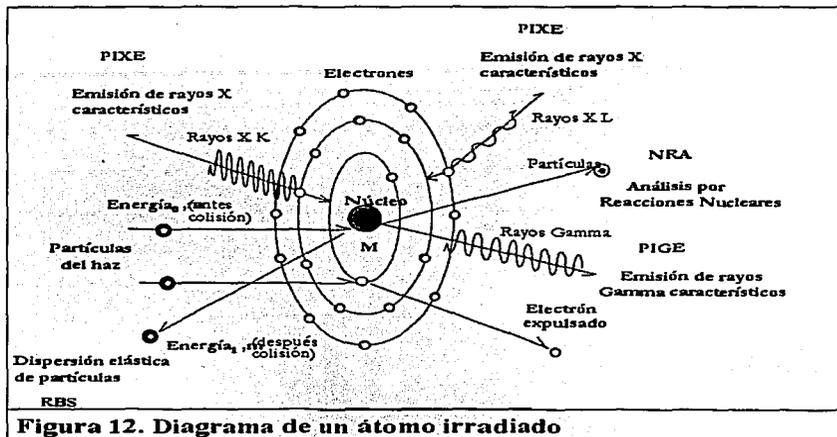
El análisis de un material arqueológico mediante PIXE puede llevarse a cabo al vacío, dentro de una cámara de irradiación, o bien en el aire a la atmósfera, según se requiera. El dispositivo con el haz externo es el más adecuado para el estudio de objetos en arqueología y arte, ya que no hay limitación en cuanto a la forma y al tamaño del objeto. Además se puede utilizar en materiales que no se pueden exponer al vacío, como manuscritos y pinturas, esto es particularmente útil en el caso de objetos irregulares, los

metales son uno de los materiales más adecuados para el análisis mediante las técnicas de origen nuclear. No sólo es posible determinar la composición de aleaciones, también pueden utilizarse para estudiar las técnicas de orfebrería .

2.2.- Fundamentos de PIXE.

Un átomo se puede considerar como un núcleo con carga positiva y alrededor de este núcleo se encuentran los electrones distribuidos en niveles de energía. (figura 12)[21]. Cuando el haz de partículas incide y penetra en un material se lleva a cabo la expulsión de los electrones de las capas internas del átomo, dejando al átomo ionizado y excitado. Para regresar al estado estable del átomo, los electrones de las capas más externas tienden a ocupar el lugar de los electrones expulsados, produciéndose como consecuencia la emisión de fotones de rayos **X** en cada transición. Las energías de los fotones emitidos es característica del elemento en cuestión, por lo cual es posible, mediante la medición de dicha energía la identificación del elemento. Este fenómeno es la base de la técnica PIXE. De hecho, a partir del conjunto de rayos **X** característicos producidos y sus intensidades es posible llevar a cabo un análisis cualitativo y cuantitativo del material irradiado.

Debido a la existencia de niveles de energía discretos en un átomo, el electrón expelido en el proceso descrito previamente puede corresponder a diferentes capas, al igual que el electrón que ocupa la vacante. Esto da origen a grupos de rayos **X** bien determinados, y que tienen una denominación acorde con la capa de la cual se removió el electrón original. Así, los rayos **X** que fueron emitidos al llenar las vacantes en la capa **K** del átomo (número cuántico principal $n = 1$), se llamará rayos **X K**; los rayos **X** emitidos en una transición en la capa **L** (número cuántico secundario $n = 2$) serán rayos **X L**, y así sucesivamente.



Por otra parte, el electrón que llena la vacante puede provenir de un gran número de subniveles, esto sólo está limitado por las reglas de selección de la mecánica cuántica en transiciones atómicas. Esta situación hace que aparezcan una cierta cantidad de rayos X K, de rayos X L, etc., que también deben identificarse. La distinción se hace en relación a la intensidad relativa que cada uno de estos rayos X tiene dentro de su grupo. Así, los rayos X K más intensos serán los rayos X K_{α} siguiéndole los rayos X K_{β} . Cada uno de estos rayos X puede a su vez, estar compuesto por un cierto número de transiciones, que se reconocen por un subíndice α_1 existiendo así los rayos X K_{α_1} , K_{α_2} , L_{β_1} , L_{β_2} . A las transiciones más importantes para el análisis con PIXE se les conoce como de Siegbahn [20].

La probabilidad de producir los fotones de rayos X de una capa en particular, o **Sección Eficaz de Producción de Rayos X**, σ^x es una magnitud física que depende de varios factores, como son el proyectil, su energía de incidencia, y el átomo en particular. Para rayos X K se relaciona

con la probabilidad de ionizar el átomo, o **sección eficaz de ionización**, a través de la ecuación :

$$\sigma_{Kp}^x = \sigma_K^1 \omega_K \left(\frac{\Gamma_{Kp}}{\Gamma} \right) \quad (2.1)$$

Donde σ_K^1 es la sección eficaz de ionización de la capa K , ω_K es el rendimiento de fluorescencia de la misma capa y $\frac{\Gamma_{Kp}}{\Gamma}$ es la intensidad relativa de todas las posibles transiciones que producen radiación en la línea p o intensidad relativa. El rendimiento de fluorescencia es el cociente del número total de fotones X emitidos entre el número total de vacantes en la capa K[17].

El poder de frenado es una magnitud que se necesita conocer para saber cómo se frenan las partículas del haz dentro del material, es decir, es necesario conocer la pérdida de energía por unidad de distancia atravesada $\frac{dE}{dx}$ de los iones para poder realizar una cuantificación de la composición del material. Las partículas cargadas de un haz de iones pierden energía dentro de un material principalmente mediante su interacción con los electrones y los núcleos atómicos. A la primera se le conoce como frenado electrónico, mientras que a la segunda como frenado nuclear. La mayor parte de la energía de las partículas se pierde por la interacción con las capas electrónicas.

La sección eficaz de frenado ϵ es una propiedad que no depende de la densidad del material y se define como:

$$\epsilon = \frac{1}{N} \frac{dE}{dx} \quad (2.2)$$

N es la densidad atómica, sus unidades son $eV \cdot cm^2 / 10^{15}$ átomos.

El poder de frenado S se define como:

$$S(E) = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \quad (2.3)$$

donde ρ es la densidad del material, por lo que sus unidades son $eV \cdot cm^2/g$.

Debido a que la sección eficaz de frenado y el poder de frenado son proporcionales la relación entre ellas es :

$$S = \frac{N_0}{A} \varepsilon \quad (2.4)$$

Donde N_0 es el número de Avogadro y A la masa atómica.

A partir de la sección eficaz de frenado se puede obtener la distancia atravesada por un proyectil que incide sobre el material a un ángulo Φ con respecto a la normal a la superficie y con una energía E_0 mediante la siguiente relación [21].

$$\frac{x}{\cos \phi} = -\frac{1}{N} \int_{E_0}^0 \frac{dE}{\varepsilon(E)} \quad (2.5)$$

El alcance R de una partícula cargada dentro de la muestra se define como la proyección de la trayectoria recorrida hasta que la partícula se frena completamente:

$$R = -\frac{\cos \phi}{N} \int_{E_0}^0 \frac{dE}{\varepsilon(E)} \quad (2.6)$$

La máxima profundidad que se puede analizar con un haz de iones a una energía de incidencia E_0 es menor o igual que el alcance de los iones.

El proceso de pérdida de energía de cada una de las partículas del haz de iones, conocido como **Dispersión en Energía**, ocurre mediante una serie de colisiones individuales por lo que es un proceso estadístico y por lo tanto es un proceso sujeto a fluctuaciones (fig. 13)[21]. De acuerdo con el modelo

de Bohr la distribución de energías es gaussiana y la dispersión en energía "straggling" Ω_B en un blanco monoelemental se puede calcular mediante la siguiente expresión.

$$\Omega_B^2 = 4\pi (ze^2)^2 NZt \quad (2.7)$$

Donde t es el espesor del material atravesado en cm. La aproximación gaussiana no funciona a menores energías ya que el ion captura electrones, por lo que disminuye su carga, y tampoco funciona cuando la pérdida de energía es mayor al 25%. Existen correcciones al modelo de Bohr que permiten calcular la dispersión de energía en esos casos.

En el caso de la técnica PIXE, la dispersión de energía no influye de manera significativa para los resultados de análisis, ya que es menor al 5% para bajas energías ($E < 1MeV$) y menor al 0.5% para energías mayores en matrices compuestas por elementos pesados [22]

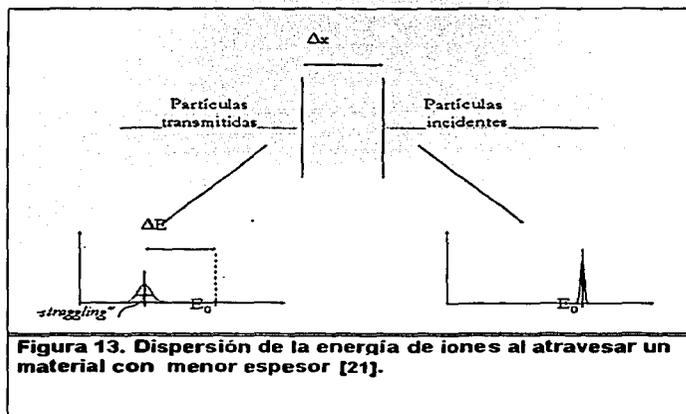


Figura 13. Dispersión de la energía de iones al atravesar un material con menor espesor [21].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Otro factor muy importante que se debe considerar en un análisis por PIXE es la **Atenuación de los rayos X** al salir del material y en el caso del análisis a la atmósfera la atenuación en ella. La absorción ocurre cuando los fotones (rayos X o γ) ceden toda su energía al medio y desaparece en una única interacción (efecto fotoeléctrico o producción de pares). Si la dispersión el fotón cede una parte de su energía a los electrones del medio por lo que después de la interacción la energía del fotón es menor y por lo tanto cambia su dirección (efecto Compton).

El coeficiente de atenuación lineal μ expresa la probabilidad de interacción por unidad de longitud de los fotones en el medio y se relaciona con las secciones eficaces de efecto fotoeléctrico σ_F , efecto Compton σ_c , y producción de pares σ_p , de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\mu = (\sigma_F + \sigma_c + \sigma_p) \rho \frac{N_0}{A} \quad (2.8)$$

Donde ρ es la densidad del material, N_0 el número de Avogadro, y A es la masa atómica expresada en gramos. Para el análisis PIXE el fenómeno predominante es el efecto fotoeléctrico.

El **coeficiente de atenuación másica** se define como : $\frac{\mu}{\rho}$ y no depende del estado físico o químico del material. Si se trata de un material homogéneo compuesto por diferentes elementos, se puede emplear la aditividad lineal de los coeficientes de atenuación másica:

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i C_i \frac{\mu_i}{\rho_i} \quad (2.9)$$

Donde C_i es la concentración de la masa del elemento i. Los coeficientes de atenuación tanto teóricos como experimentales se pueden consultar en diferentes publicaciones.

Para detectar la emisión de los rayos X se utilizan **Detectores de rayos X** de estado sólido, que consisten en un cristal semiconductor de Si contaminado con impurezas de Li que se evaporan en un extremo de la oblea de Si y posteriormente se difunden en el cristal para generar la zona activa del detector. Cuando inciden los rayos X en la zona activa del detector provocan pares electrón-hueco a lo largo de su trayectoria. Esta carga forma una señal eléctrica que se procesa para conocer la información. Conectado a un circuito al detector se puede obtener que los pulsos de carga producidos sean proporcionales a la energía de los fotones. Estos pulsos son procesados en un amplificador. Utilizando un convertidor analógico digital (ADC) se manda la señal a un analizador multicanal (MCA) Este analizador clasifica los pulsos de acuerdo a la altura y les asigna un número de canal de tal forma que esta información se puede almacenar en una microcomputadora y obteniéndose una gráfica llamada espectro. El procesamiento de la señal del detector es tal que la altura del pulso es linealmente proporcional a la energía del rayo X incidente. En la figura 14 se muestra un espectro típico obtenido por PIXE.

Otro factor importante que interviene en el análisis mediante PIXE es la **Eficiencia intrínseca** del detector ε que se define como la razón de rayos X detectados con respecto a los rayos X que inciden en el detector. Esta eficiencia depende de la atenuación de los rayos X en la ventana de Be, una capa de hielo que se forma delante del detector, el electrodo de Au o Ni y la capa muerta del detector. También interviene un factor de corrección f_c por los escapes del detector y la profundidad promedio de interacción ζ . La eficiencia está determinada por la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{e^{-\sum_{i=1}^Z \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i t_i} f_c \left[1 - e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{Si} D} \right]}{1 - \frac{\zeta}{d}} \quad (2.10)$$

En donde: $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)$ y t_i son los coeficientes de atenuación másica y los espesores de cada una de las capas que tienen que atravesar los rayos X antes de llegar al área activa del detector, D es el espesor de la oblea de silicio y d es la distancia entre el detector y la muestra. El valor de f_c se puede calcular a partir de modelos teóricos del escape de los rayos X del detector y los valores de los espesores se pueden obtener por el fabricante.

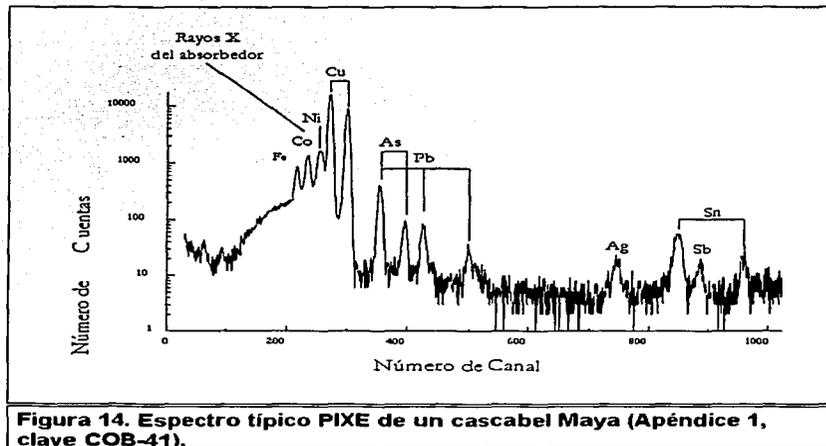


Figura 14. Espectro típico PIXE de un cascabel Maya (Apéndice 1, clave COB-41).

En los picos obtenidos por PIXE correspondientes a los rayos X emitidos por la muestra se encuentran superpuestos a un fondo continuo de radiación. Este fondo es el principal determinante de los límites de detección de cualquier elemento. El fondo se origina por la radiación de frenado de los electrones del material, de las partículas y la radiación gamma producto de las reacciones nucleares que se llevan a cabo durante la interacción de los núcleos atómicos con el haz.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Pueden existir otras contribuciones al fondo del espectro de rayos X asociadas a la detección de estos rayos X, o a la naturaleza de la muestra. Cuando hay elementos abundantes en la muestra los efectos de apilamiento también contribuyen al fondo a la derecha del pico intenso correspondiente a dicho elemento. Esto afecta los límites de detección de otros elementos cercanos. Las partículas retrodispersadas que entren al área activa del detector pueden ocasionar fondos intensos. Esto se puede evitar colocando un absorbedor que lo proteja [21].

2.3.-Análisis cualitativo mediante PIXE.

Cuando el haz atraviesa el material produce ionización, por lo tanto, la intensidad de los rayos X emitidos N_{xi} es proporcional a la cantidad de átomos i que están presentes en el material C_i , y al flujo de partículas f :

$$N_{xi} \propto fC_i \quad (2.11)$$

Como ya se mencionó anteriormente, el haz de partículas al penetrar tiene una cierta probabilidad de producir la ionización por su interacción, esta probabilidad depende de cada átomo, de su arreglo de electrones, de la energía y tipo de las partículas del haz:

$$N_{xi} \propto fC_i\sigma^x(E) \quad (2.12)$$

Donde $\sigma^x(E)$ es la sección eficaz de producción de rayos X.

Al atravesar el material las partículas del haz pierden energía por la interacción con las capas electrónicas hasta detenerse. La pérdida de energía de las partículas en un espesor pequeño de un material dx puede describirse mediante el poder de frenado $S(E)$. Por lo tanto el número de rayos X producido es proporcional a dicho espesor:

$$N_{xi} \propto f \frac{C_i \sigma^x(E)}{S(E)} dE \quad (2.13)$$

Considerando además que los rayos X inducidos en el material por las partículas son absorbidos en el material mismo y sólo son detectados una parte de éstos, el número de rayos X detectados será proporcional al número de rayos X transmitidos $T(E)$.

$$N_{xi} = f c_i \frac{\sigma^x(E)}{S(E)} T(E) dE \quad (2.14)$$

Debe tomarse en cuenta que el proceso de ionización, pérdida de energía y absorción de rayos X, se lleva a cabo desde la energía inicial de incidencia del haz hasta que la partícula se detiene en el material. El proceso de detección dependerá de la eficiencia del detector de rayos X ϵ_i y la electrónica asociada, por lo que considerando la producción de rayos X por irradiación de partículas está dada por:

$$N_{xi} = K f \epsilon_i C_i \int_{E_0}^{\infty} \frac{\sigma^x(E)}{S(E)} T(E) dE \quad (2.15)$$

Donde K es una constante. En base a lo anterior un análisis cualitativo puede llevarse a cabo considerando las intensidades de los picos de rayos X normalizados por el flujo f .

El número de rayos X detectados puede normalizarse mediante un monitor de irradiación. Dado que el haz atraviesa la atmósfera, el número de rayos X de argón producidos es proporcional al flujo del haz considerando la concentración de argón constante en la atmósfera. Así, para realizar un análisis cualitativo el número de rayos X de los diversos elementos debe normalizarse por la intensidad de los rayos X de argón presentes en el

espectro PIXE para efectuar una comparación de intensidades (y de concentraciones) [23]

$$\frac{N_{xi}}{N_{xAr}} \propto C_i \quad (2.16)$$

2.4.- Análisis cuantitativo mediante PIXE.

Una vez que se obtiene el espectro de PIXE el primer paso para realizar un análisis cuantitativo es el cálculo de las áreas correspondientes a los picos de interés. La relación que hay entre las áreas de los picos del espectro y las concentraciones de los elementos en la muestra es la base del análisis cuantitativo mediante PIXE. Para realizar estos cálculos, se modela una función analítica que simula los picos mediante gaussianas modificadas y el fondo mediante funciones exponenciales. Para realizar la cuantificación generalmente se utilizan las líneas K para los elementos con número atómico $z < 50$ y para elementos con $z > 50$ se utilizan las líneas L.

Para una transición i , el número de rayos X $dN_x(Z)$ producidos por la interacción entre un elemento de número atómico Z y las partículas del haz en una sección d_x de su trayectoria en la muestra es proporcional a la distribución de dicho elemento en la sección irradiada y a la sección eficaz de producción de rayos X $\sigma_i^x(E)$. En un material homogéneo, la distribución del elemento en la muestra es $\frac{N_0 C_z \rho}{A_z}$ donde N_0 es el número de Avogadro, A_z es la masa atómica del elemento, ρ es la densidad del material y C_z es la concentración en masa del elemento, por lo que el número de rayos X producidos en el elemento esta dado por la fórmula:

$$dN_x(Z) \propto \sigma_i^x(E) \frac{N_0 C_z \rho}{A_z} dx \quad (2.17)$$

La constante de proporcionalidad involucra las condiciones de irradiación y de detección así como la transmisión de los rayos X en la muestra $T_z(x)$

desde una profundidad x . Mientras más partículas interaccionen con los átomos del material, mayor será el número de rayos X emitidos por lo que $dN_x(Z)$ también es proporcional a la carga incidente en la muestra Q . La detección de rayos X depende de la eficiencia del detector ϵ_z para el elemento de interés y del ángulo sólido de detección $\frac{\Omega}{4\pi}$. En la geometría del análisis PIXE ϕ es el ángulo de incidencia del haz y θ es el ángulo de detección.

Se puede relacionar la distancia dx con la energía a través del poder de frenado de la matriz M (elementos mayores de la muestra) $S_M(E)$ de manera que la transmisión de rayos X sea una función de la energía de las partículas del haz.

La transmisión de los Rayos X está dada por la fórmula

$$T_z(E) = e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_M \frac{\cos\phi}{\sin\theta} \int_{E_0}^E \frac{dE}{S_M(E)}} \quad (2.18)$$

Donde $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_M$ es el coeficiente de atenuación másica de la matriz y E_0 es la energía de incidencia de las partículas del haz.

La sección eficaz de producción de rayos X se puede poner en términos del rendimiento de fluorescencia $\omega_{i,z}$, la intensidad relativa de las líneas de

rayos X $b_{i,z} = \frac{\Gamma_{i,\rho}}{\Gamma_i}$ y la sección eficaz de ionización $\sigma_z^1(E)$. Integrando

sobre todas las contribuciones de la trayectoria de las partículas del haz la intensidad de rayos X $N_x(Z)$ está descrita por la siguiente fórmula:

$$N_x(Z) = \frac{\Omega}{4\pi} Q \epsilon_z \omega_{i,z} b_{i,z} \frac{N_0 C_Z}{A_Z} \int_{E_0}^{E_f} \frac{\sigma_z^1(E) T_z(E)}{S_M(E)} dE \quad (2.19)$$

Esta ecuación es válida para materiales homogéneos. En esta fórmula la integral está relacionada con los efectos de matriz, es decir, la influencia de los elementos mayores en la determinación de la concentración del elemento de interés.

La determinación se puede hacer de manera directa, pero se requiere conocer todas las variables involucradas y se debe caracterizar el dispositivo experimental de manera muy precisa. Otra forma de realizar la cuantificación es utilizando materiales de referencia certificados que pueden ser monoelementales o con una matriz similar a la de la muestra que se analiza.

Se pueden simplificar los cálculos y los problemas debido a la caracterización del dispositivo experimental, si se irradia el material de referencia del cual se conocen las concentraciones de los elementos de interés bajo las mismas condiciones.

Para un elemento con número atómico Z presente en la muestra y en el material de referencia, si se utiliza la razón de intensidades de rayos X se obtiene una fórmula donde se simplifican los factores asociados a la instrumentación como el ángulo sólido y eficiencia del detector y los rendimientos de fluorescencia e intensidades relativas para un elemento, por lo que la fórmula queda así:

$$\frac{N_x(Z)}{N_z(Z)} = \frac{Q \cdot C_z \int_{E_0}^{E_f} \frac{\sigma_z^1(E) T_z(E)}{S_M(E)} dE}{Q \cdot C_z \int_{E_0}^{E_f} \frac{\sigma_z^1(E) T_z(E)}{S_M(E)} dE} \quad (2.20)$$

Debido a que tanto el coeficiente de atenuación másico como el poder de frenado involucran un conocimiento de la matriz, se deben utilizar procedimientos iterativos para conocer las concentraciones iniciales y a partir de ellas se calculan las integrales de la ecuación. Posteriormente se comparan con las intensidades de rayos X obtenidas experimentalmente y se calcula un nuevo conjunto de concentraciones. Este procedimiento se

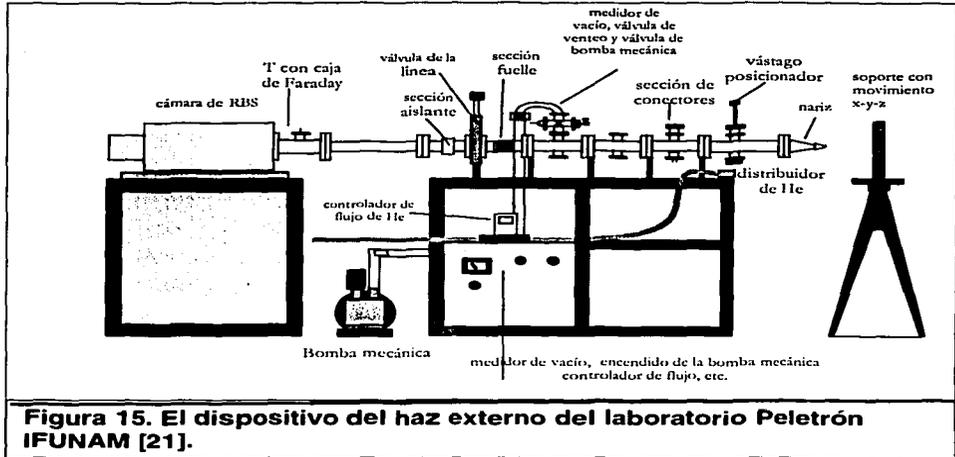
continúa hasta que se obtiene la convergencia entre los valores calculados y los experimentales considerando a las concentraciones consistentes.

Existen diferentes programas de cómputo que realizan el ajuste del espectro así como el cálculo de las concentraciones. Una vez que se incluyen las correcciones pertinentes en los cálculos debidas a la fluorescencia secundaria, se pueden obtener las concentraciones de los elementos mayores con precisiones del 3%. Para elementos traza, éstas son usualmente del 5 al 8 %.

2.5.- El Dispositivo de Haz Externo.

Mediante un dispositivo de haz externo se puede extraer el haz a la atmósfera y realizar el análisis fuera de una cámara. En este tipo de análisis no se tienen restricciones en cuanto al tamaño y forma de la muestra y su manejo es más simple al irradiarlo. En la atmósfera se disipa el calor más fácilmente y por lo tanto se minimizan los daños debido al aumento de la temperatura producidos por la energía depositada por el haz en materiales orgánicos. Se reducen las alteraciones en la muestra producidas por la baja presión, como la volatilización de algunos elementos. También se evita el acumulamiento de carga en la superficie de las muestras aislantes y los efectos por descargas (Fig.15)[21].

Algunas de las desventajas son la pérdida en la resolución de energía que se degrada por el paso del haz a través de la atmósfera, el fondo de radiación continua es mayor por lo que disminuye la sensibilidad de detección y la exposición a la radiación. Sin embargo estas desventajas pueden ser minimizadas utilizando procedimientos de seguridad apropiados, metodologías de análisis bien establecidas y un dispositivo experimental adecuado.



Entre las características generales del dispositivo de haz externo se encuentran:

1. Se utilizan aceleradores capaces de producir haces de protones con energías de entre 2 y 4 MeV.
2. Las corrientes utilizadas van de picoamperes a nanoamperes.
3. El diámetro del haz puede ser micrométrico o milimétrico.
4. El diámetro del haz se puede determinar mediante colimadores (obteniendo hasta centenas de μm).

Se utiliza una ventana delgada que permite la transmisión del haz a la atmósfera pero al mismo tiempo asegura el vacío en la línea del acelerador. La ventana debe ser resistente tanto al cambio de presiones como al desgaste mecánico y al daño producido por la irradiación, además de producir la menor pérdida de energía y dispersión de energía ("straggling") posibles en el haz.

Para minimizar el fondo debido a la interacción del haz con la ventana se utilizan láminas delgadas elaboradas con metales como el aluminio, el zirconio o níquel, o materiales ligeros como los polímeros Kapton o Mylar.

Los espesores de las ventanas utilizadas varían de 2 a 25 μ m. Las ventanas más delgadas se soportan mediante una rejilla o se someten a un flujo de aire frío para maximizar su vida útil. Se recomienda el uso de válvulas de seguridad que se cierran automáticamente para asegurar el vacío en la línea en caso de que la ventana se rompa.

El análisis se puede realizar en otra atmósferas además del aire, el gas más utilizado es el helio, debido a que el helio tiene mayor conductividad térmica, se reducen los daños por elevación de temperatura. Además de que no se observan los rayos X K del argón del aire.

Para la medición de la carga en blancos delgados o gruesos se pueden utilizar diferentes diseños de cajas de Faraday adaptados para medir la carga. También es posible usar las partículas retrodispersadas de la ventana para medir la carga y además para monitorear el deterioro producido por el haz en la ventana.

Para visualizar el punto de impacto del haz sobre la muestra, en la mayoría de los dispositivos se utiliza un láser que coincide con el punto de incidencia del haz y para calibrar el sistema (Figura 16).



Figura 16.
Sistema de
alineación
por láser y
monitoreo
de la
muestra
(cascabel-
1, COB-41)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.6.-Antecedentes de las aplicaciones de PIXE al estudio de aleaciones metálicas arqueológicas (oro y bronce).

PIXE y otras técnicas complementarias basadas en el uso de aceleradores de partículas se han aplicado con éxito en el estudio de objetos metálicos e históricos. En un trabajo en el análisis de joyas se tiene el estudio mediante PIXE utilizando un haz externo, de una colección de piezas funerarias de oro Mixtecas del Museo Nacional de Antropología e Historia [24]. Otras piezas de la misma procedencia han sido analizadas en vacío para determinar la composición de las aleaciones empleadas. En ambos casos se observa que la composición de las aleaciones están constituidas en promedio de 75% de oro, 20% de plata y 5% de cobre.

En general, en el caso de bronce y cobres es necesario llevar a cabo la limpieza de la capa fina de patina (capa de corrosión superficial) si ésta es muy gruesa, para alcanzar y analizar el interior de la aleación. A diferencia de las piezas elaboradas con metales más nobles, estas piezas sufren una rápida corrosión. Es claro que, el estudio de los procesos de corrosión es de gran importancia en lo que concierne a la restauración y conservación de artefactos. El problema de la corrosión fue bien conocido por los antiguos metalurgistas chinos, cabe señalar que se han estudiado artefactos de la antigua china como una cabeza de flecha, una reliquia proveniente del mausoleo del emperador Qin Shihuang (221 –207 A. C), es decir, con 2200 años de antigüedad, la cual presenta una superficie que fue tratada como parte de su proceso de fabricación para formar una capa protectora de $\text{CaO} + \text{SnO} + \text{PbO} + \text{Cr}_2\text{O}_3$ y evitar así la corrosión [25].

El análisis de soldaduras y tecnologías de fabricación ofrece una importante área de investigación. Un ejemplo claro del estudio de métodos de soldadura antigua está dado por la investigación desarrollada en torno a un pendiente Iraní de oro del siglo IV a. de c. Se observaron varios tipos de soldaduras en diferentes regiones de la pieza, cada uno con diferentes puntos de fusión y diferentes procesos de soldado. A partir de este estudio se rescató esta tecnología y se desarrolló una soldadura de bajo punto de fusión para aleaciones de oro.

El análisis de monedas romanas tanto de oro, plata, y cobre se ha realizado para estudiar procesos económicos en varias épocas y regiones. Se han identificado piezas sometidas a procesos de enriquecimiento superficial y heterogeneidades que permiten identificar el proceso de fabricación y acuñado. También ha sido posible determinar fuentes de metales empleados en la elaboración de aleaciones de monedas a partir de elementos traza presentes [25].

Nuevos métodos se han desarrollado para poder estudiar aleaciones demasiado heterogéneas o con diferente concentración en su superficie: La técnica PIXE diferencial combinada con otro método nuclear conocido como RBS resulta el método ideal para el estudio e identificación de diferentes procesos de dorado o plateado, o de enriquecimiento en oro o plata en una superficie [26]. De esta manera, el método de dorado por oxidación o *mise en couleur* utilizado en el dorado de artefactos y objetos de la metalurgia antigua del oro en América y descrito anteriormente ha sido analizado inclusive a nivel microscópico. La aplicación de las metodologías mencionadas, dio como resultado la caracterización completa de la tecnología empleada por ejemplo de un pendiente de oro descubierto en San Francisco Caxonos, Oaxaca [27]. La aleación de la pieza es muy diferente a las piezas mixtecas de Oaxaca y se observó un dorado por oxidación. En promedio, la composición de oro en el interior del pendiente corresponde a un 50% mientras que en su superficie es de un 95%. La capa enriquecida en oro tiene un espesor promedio de 3.5 μm .

Otro ejemplo es el estudio de algunos objetos hechos de aleaciones de cobre y oro cuyo origen es tarasco. En este caso se llevó a cabo un típico análisis mediante PIXE con un haz externo y RBS en vacío. Lo anterior para determinar los tipos de aleaciones utilizadas en la realización de los objetos y su homogeneidad, así como para ubicarlos cronológicamente. Como se explicó en el capítulo 1, según Hosler [7] en la metalurgia del occidente de México existen 2 periodos principales dentro del postclásico, el más temprano se utilizó principalmente cobre nativo, y en el tardío se usó aleaciones de Cu- As y Cu- Sn. Este estudio unió a las ventajas del uso de

las técnicas de origen nuclear, y el empleo de técnicas convencionales de metalografía [28].

Otros estudios empleando PIXE han sido aplicados al análisis de piezas de otras regiones mesoamericanas, uno de éstos mencionado en el capítulo anterior se refiere al sitio de Paquimé [8].

La mayor parte de los estudios de metales prehispánicos han utilizado otras técnicas de análisis como absorción atómica y fluorescencia de rayos X. En particular la primera es destructiva y es necesario determinar que elemento se desea analizar previamente al análisis pues no se tiene una señal de todos los elementos presentes en una medición como es el caso de PIXE. En realidad existen muy pocos resultados analíticos, por ello la importancia que tiene este trabajo y de sus conclusiones.

CAPITULO 3

Análisis de bronce mayas

3.1- Contexto Arqueológico.

El sitio arqueológico donde fueron encontrados los bronce sujetos al presente estudio comprende una pequeña región de Chiapas, en la zona Maya, ubicado en los municipios de la Independencia y, principalmente, "Las Margaritas"; el primero tiene una superficie de 170 Km² con una población actual de 2039 habitantes, y el segundo reúne 4846 pobladores en un área de 571 Km² este colinda con las municipalidades de Comitán, Altamirano, Chanal, Ocosingo, y "La Independencia"; esta última, por su parte, limita con "La Trinitaria" y ambos municipios lo hacen con la República de Guatemala (fig. 17) [29].

Este sitio arqueológico fue catalogado por el Arqueólogo Carlos Álvarez como M-II-19 Cimientos de las Margaritas que se encuentran ubicados a una latitud 16° 17'45" N y a una longitud 91° 57'10" O.

El asentamiento se localiza 4 km al sureste de las Margaritas, a una altitud media de 1530 msnm; cubre un área de 12.5 ha, sobre tres cerros de 50 m de altura y dos elevaciones menores, que antiguamente formaban islas en una ciénega que ha sido desecada con fines agrícolas.

Se destaca la presencia de hileras paralelas de postes delgados que sobresalen apenas 30 cm sobre el piso del valle, y es posible que estos postes correspondan a la cimentación de puentes de madera sobre la ciénega que comunicaban a los cerros con las estructuras.

Se puede agregar que este sitio (M-II-19) fue designado como la "zona arqueológica en la ciénega de las Margaritas" en 1924, debido a que aún en este siglo una gran extensión de la porción suroccidental del valle de las Margaritas se encontraba cubierto por agua.

Los Cimientos de "Las Margaritas" constituía el principal centro de población durante el posclásico en la región, se menciona como un hecho importante, el que se ubicaban pequeños grupos ceremoniales

en las cimas de los tres cerros mayores, sin embargo los materiales arqueológicos son escasos, pero en las terrazas inferiores son muy abundantes, lo que indica que la mayor actividad humana se realizaba cerca de la orilla de la antigua ciénega [29].

Entre los abundantes materiales arqueológicos encontrados en el sitio pueden mencionarse fragmentos de comales, coladores, incensarios, metates de basalto, puntas de obsidiana y entre los metales se encontraron los artículos motivo del presente estudio. A partir del análisis de los materiales recobrados, se observa que la ocupación se inicia durante el Clásico Terminal y aumenta considerablemente en el periodo Posclásico.

Existe controversia entre los documentos coloniales y entre los estudios científicos realizados en relación al grupo *tojolobal*. La distribución de los asentamientos tojolobales y tzeltales, en la porción suroriental de la Altiplanicie de Chiapas, al momento de la conquista española, así como durante el siglo XVI es incierta. El problema es aún más complejo para la época prehispánica. Se desconoce mención alguna del tojolobal anterior al final del siglo XVII.

Durante la segunda mitad del siglo XVI, es reportada la presencia de hablantes del tzeltal en la región. Un siglo más tarde, hacia fines del XVII, aparece en algunos documentos el término *chanaval* empleado para designar al chanaval y al tojolobal; se creía que los tojolobales habían arribado al lugar unos 100 años después de la conquista. Sin embargo, gracias a nuevas investigaciones, es posible suponer que la etnia tiene una mayor antigüedad en el área que ahora habita [29].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 17. Ubicación del sitio arqueológico "Las Margaritas"

Existen estudios recientes para indagar el papel que jugó el grupo tojolobal dentro de la dinámica económica, social y cultural del área, así como qué distribución geográfica tuvo durante la época precolombina, cuál es la antigüedad de sus asentamientos y para saber si los tojolobales son originarios de esta región y, por consiguiente, los constructores de las zonas arqueológicas, o llegaron en una época posterior procedentes de otras regiones.

Por otra parte, el estudio de la colección de los bronce encontrados en el sitio arqueológico, puede proporcionar información importante sobre

A continuación se presenta una descripción de las piezas (ver Apéndice 1).

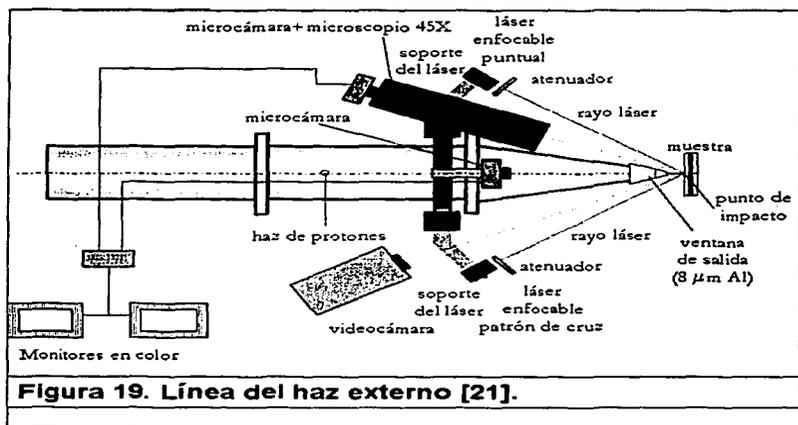
1. Cascabel 1, Cascabel elaborado por el método de "cera perdida", tiene argolla simple, perpendicular a la boca y reborde alrededor de ella. Cascabel esférico estilo "A" según Lothrop [2] y del tipo 1A2a según Pendergast.[4]
2. Cascabel 2, Fragmento de cascabel del tipo "falsa filigrana" de color verde, con una argolla de suspensión integrada al mismo cuerpo del cascabel. Cascabel del tipo "F" según Lothrop [2] y del tipo 8d según Hosler.[6]
3. Cascabel 3, Fragmento de cascabel de cobre de tipo esférico partido a la mitad, con anillo de suspensión.
4. Cascabel 4, Fragmento de cascabel de cobre de color verduzco, de forma plana.
5. Medio cascabel, Medio cascabel de cobre, al cual no tiene argolla para sujetarlo, tiene una capa de óxido color verde (patina).
6. Fragmento de cascabel 1, Fragmento de cascabel de cobre de forma cóncava, de color verduzco y con una capa de óxido.
7. Fragmento de cascabel 2, Cascabel de cobre fragmentado de forma cóncava con una ligera capa de óxido.
8. Anillo de suspensión de un cascabel, Pequeña argolla aparentemente usada como suspensión de un cascabel de cobre.
9. Cincel 1, Cincel aplanado en ambos extremos con una capa de óxido de color café.
10. Cincel 2, Cincel con una ligera capa de óxido con un extremo más puntiagudo que el otro.
11. Cincel 3, Punzón encontrado el 03-III-95 en el lado oeste del Cimiento de las Margaritas.
12. Cincel 4, punta de cincel encontrada en el lado oeste el 15-II- 95 en los Cimientos de las Margaritas.
13. Hacha, punta de cincel encontrada en el lado oeste el 15-II- 95 en los Cimientos de las Margaritas.

14. Aguja 1, aguja encontrada el 25-II-95 en el lado oeste del Cimiento de las Margaritas.
15. Aguja 2, aguja de cobre elaborada por martilleo y con perforación hecha con cincel.
16. Aguja 3, aguja de cobre elaborada por martilleo y con perforación en un extremo.
17. Aguja 4, aguja de cobre elaborada por martilleo con perforación en un extremo.
18. Aguja 5, aguja de cobre elaborada por martilleo aplanada en un extremo, con un agujero a 1 cm de la orilla y con el otro extremo que termina en punta.
19. Aguja 6, aguja de cobre extremadamente larga y muy delgada, elaborada por martilleo y con un extremo aplanado con una perforación, y en el otro extremo con terminación en punta.
20. Anillo 1, parte de un anillo con perforaciones triangulares aparentemente hechas con un punzón.
21. Anillo 2, anillo de cobre completo fragmentado en dos partes, anillo liso cuya superficie exterior es convexa y la interior es cóncava.
22. Restos de metal 1, cobre con apariencia de metal derretido en forma de racimo, con una capa de óxido.
23. Restos de metal 2, Metales encontrados juntos uno tiene forma de racimo y el otro semeja la punta de un punzón.
24. Lámina 1, fragmento cubierto con una ligera capa de óxido con un tono verde.
25. Lámina 2, lámina de cobre cubierta de una capa de óxido poroso de color verduzco.
26. Lámina 3, pequeña laminilla de cobre con una ligera capa de óxido.
27. Lámina 4, fragmento de lámina de cobre de forma triangular con una ligera capa de óxido.
28. Lámina 5, laminilla de cobre ligeramente doblada por la mitad, con una ligera capa de óxido.
29. Fragmento de cobre 1, cobre encontrado asociado a un caracol, la pieza de cobre tiene forma de laminilla con una ligera capa de óxido.

30. Fragmento de cobre 2, fragmento de laminilla de cobre enrollada no se puede precisar al objeto del que procede, de color verduzco por la capa de óxido.
31. Fragmento de cobre 3, presenta una capa de pátina de color verduzco, fragmento de lámina de cobre encontrada junto con una punta de cobre aparentemente perteneciente a un punzón.

3.3.-Dispositivo Experimental.

El dispositivo experimental utilizado para llevar a cabo los análisis de los bronzes mayas, está formado por el acelerador de partículas utilizado para producir el haz de protones, y el sistema de haz externo para realizar la irradiación de las piezas arqueológicas a la atmósfera (fig. 19).



El acelerador de partículas Tandem Peletrón (fig. 20) que se emplea para producir el haz de protones funciona con un proceso de doble aceleración de los iones. Un haz de iones negativos se produce en dos fuentes externas. La fuente NEC *Alphas* y con ella se pueden ionizar gases, los iones que produce esta fuente inicialmente son positivos y al pasar por un gas de

rubidio le cede fácilmente electrones transformándolos en negativos. La otra fuente conocida como SNICS (*Source of Negative Ions by Cesium Sputtering*) funciona a partir de erosión iónica de cátodos sólidos por medio de gases de cesio, los iones aquí producidos son negativos desde el principio.

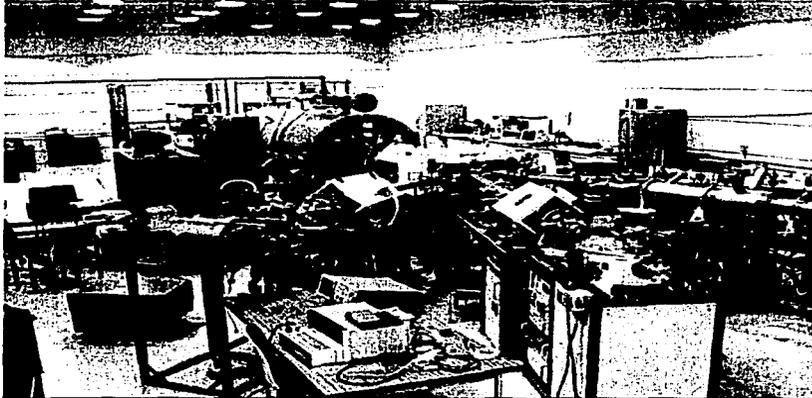


Figura 20, Laboratorio Peletrón, Instituto de Física U.N.A.M. [21]

Después se cuenta con un electroimán inyector que conduce el haz de iones negativos hacia el tubo acelerador, un BPM (*Beam Profile Monitor*) que permite monitorear la forma y sección del haz, una lente Einzel electrostática para focalizar el haz de las coordenadas X, Y sobre el plano perpendicular a su dirección y una caja de Faraday que permite medir la intensidad de corriente antes de la inyección hacia el tubo acelerador. En la parte media del tubo acelerador se hace recircular gas nitrógeno, para despojar a los iones negativos, de sus electrones para convertirlos en positivos cuando el haz de iones lo atraviesa (proceso *stripping*). El tanque del acelerador se ha diseñado de manera que la producción de radiación a su alrededor sea mínima ya que cuenta con un blindaje de plomo.

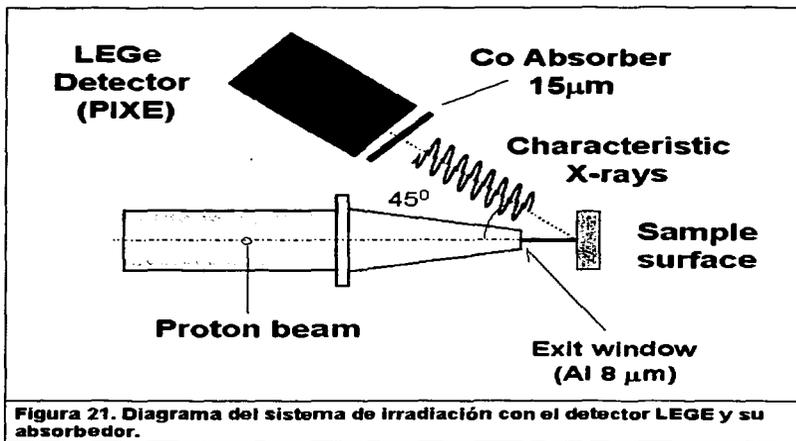
A la salida del tubo acelerador se encuentra otra caja de Faraday y otro electroimán que enfoca nuevamente el haz. Finalmente el haz es desviado a la línea deseada mediante un electroimán analizador que selecciona las partículas de acuerdo a su masa, estado de carga y energía. El haz generalmente protones, es conducido hasta una ventana delgada de un material ligero, los cuales atraviesan la ventana y se proyectan en la atmósfera con una cierta dispersión. Las piezas se colocan frente al haz de manera que mediante un sistema de láseres de diodo, uno con forma de cruz y otro circular de 1 mm de diámetro. Frente a cada láser se colocó un atenuador para regular su intensidad y facilitar la ubicación de la región de irradiación con los láseres.

El monitoreo de la muestra se lleva a cabo mediante una micro cámara a color colocada en la nariz, además de un microscopio de 45X acoplado a otra micro cámara, para ver la región de irradiación a mayor detalle. Además se utiliza un conmutador para ver las imágenes de cada una de las cámaras.

La respuesta a la irradiación de los rayos X característicos emitidos, es captada por un detector de rayos X para luego ser procesada electrónicamente y obtener el espectro PIXE de la región irradiada.

3.4.-Metodología.

La muestra se coloca frente al haz de protones los cuales son proyectados a la atmósfera y por medio del sistema de láseres es posible determinar la región de irradiación. El artefacto sujeto a estudio se irradia aproximadamente 5 minutos y la respuesta a esta irradiación, es decir, los rayos X característicos emitidos, es captada por el detector de rayos X donde es procesado electrónicamente y así obtener el espectro PIXE de la región irradiada, donde se grafica el número de cuentas (impactos) en el eje de las ordenadas contra el número de canal, en el eje de las abscisas (ver apéndice 2).



En este caso en particular se empleó un absorbedor selectivo de rayos X de Cu para impedir la saturación del detector. Se utilizó una lámina de 15 micrómetros de Cobalto. Además se utilizó un detector de rayos X tipo LEGE (fig. 21). Como material de referencia se empleó un Latón con trazas de Sn, As, Pb, Ni y Fe; NIST 1778. estos datos uno a uno se capturan en un programa computacional iterativo, el cual considera los elementos presentes en la muestra de acuerdo al análisis cualitativo, el nivel electrónico del cual el electrón fue expelido, generalmente K_{α} (para el plomo L_{α}) la eficiencia del detector para cada elemento, la energía que es de 3 MeV, el ángulo de incidencia el cual fue de 45°, el área bajo la curva del espectro para cada elemento y el porcentaje en masa estimado para cada elemento.

Después de cargar el programa PIXEINT. con los datos anteriores se pone a calcular de manera iterativa y posteriormente se obtiene el porcentaje final para cada elemento. Debido a que la mayoría piezas fueron analizadas en diferentes regiones, se obtuvieron diversos resultados, los cuales se muestran en las tablas # 2.14 y 2.15.

En la tabla # A 2.16 se presentan los mismos resultados de la tabla anterior, pero ahora con promedios finales de cada una de las piezas, ya que estos artefactos fueron analizados en dos o tres puntos, como se explicó anteriormente.

Tabla # A 2.16.-Porcentajes finales de piezas arqueológicas de "Las Margaritas", Promedios finales.									
Promedios									
Muestra	%Fe	%Ni	%Cu	%Ag	%Sb	%Pb	%As	%Sn	%As/%Sn
(1) Cascabel 1	0.0503	0.0447	97.6	0.0914	0.1873	0.4591	0.8293	0.7853	1.6146
(2) Cascabel 2	0.2436	0.2172	98.0	0.0648	0.1448	0.0000	0.5894	0.7751	1.3645
(3) Cascabel 3	0.1596	0.1428	97.8	0.0720	0.1156	0.4028	0.8593	0.4046	1.2639
(4) Cascabel 4	0.1744	0.1516	99.2	0.0273	0.0305	0.0000	0.3802	0.0422	0.4224
(5) Medio cascabel	0.4347	0.3625	96.1	0.1559	0.2472	0.0000	1.3187	1.4300	2.7487
(6) Fragmento de cascabel 1	0.1913	0.1729	98.0	0.0880	0.1254	0.0000	0.7141	0.6842	1.3982
(7) Fragmento de cascabel 2	0.0315	0.0250	85.0	0.1681	0.1386	12.7	1.9618	0.0139	1.9757
(8) Anillo suspensión de un cascabel	0.1022	0.0852	93.2	0.0119	0.0122	0.0411	0.0679	6.4681	6.5360
(9) Cíncel 1	0.0198	0.0167	98.3	0.0798	0.0700	0.0411	0.1836	1.2763	1.4599
(10) Cíncel 2	0.0197	0.0171	99.2	0.0383	0.0133	0.0402	0.0613	0.6547	0.7160
(11) Cíncel 3	0.0154	0.0131	95.1	0.0712	0.1030	0.0000	0.3873	4.3272	4.7145
(12) Cíncel 4	0.0278	0.0236	96.6	0.0593	0.0992	0.0000	0.3786	2.7650	3.1436
(13) Hacha	0.0876	0.0759	98.7	0.0327	0.0865	0.0000	1.0673	0.0000	1.0673
(14) Aguja 1	0.0577	0.0496	96.4	0.0907	0.0854	0.0000	0.2078	3.09	3.3015
(15) Aguja 2	0.0305	0.0260	95.1	0.1249	0.2984	0.0718	0.4570	3.89	4.3486
(16) Aguja 3	0.0351	0.0297	96.7	0.0679	0.0971	0.0000	0.6551	2.43	3.0892
(17) Aguja 4	0.0250	0.0227	99.4	0.0715	0.0443	0.0000	0.1206	0.3127	0.4333
(18) Aguja 5	0.0397	0.0346	97.5	0.1043	0.0817	0.0000	0.2779	2.00	2.2747
(19) Aguja 6	0.0288	0.0254	99.6	0.0391	0.0325	0.0000	0.2788	0.0000	0.2788
(20) Anillo 1	0.0613	0.0504	86.1	0.1180	0.1634	0.0000	0.5630	12.90	13.4626
(21) Anillo 2	1.0339	0.9141	82.1	0.0823	0.1166	0.1438	0.4420	15.13	15.5688
(22) Resto de metal 1	0.0868	0.0756	99.8	0.0425	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(23) Resto de metal 2	0.0278	0.0232	99.4	0.0656	0.1519	0.1064	0.0633	0.1136	0.1769
(24) Lámina 1	0.0248	0.0207	97.2	0.1393	0.2783	0.0000	0.5172	1.80	2.3214
(25) Lámina 2	0.0286	0.0251	98.3	0.1213	0.0623	0.0000	0.2055	1.28	1.4836
(26) Lámina 3	0.0210	0.0173	98.8	0.0539	0.0624	0.2628	0.1560	0.5795	0.7355
(27) Lámina 4	0.0141	0.0114	97.8	0.0564	0.0940	0.0000	0.5065	1.4830	1.9895
(28) Lámina 5	0.0182	0.0156	99.5	0.0107	0.0213	0.0000	0.4681	0.0000	0.4681
(29) Fragmento de Cu 1	0.0132	0.0105	99.9	0.0473	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
(30) Fragmento de Cu 2	0.0498	0.0339	98.6	0.0157	0.2806	0.1822	0.8355	0.0000	0.8355
(31) Fragmento de Cu 3	0.0205	0.0174	96.5	0.0814	0.0844	0.0000	0.3401	3.0032	3.3432

3.5 Resultados del análisis por PIXE.

Los elementos detectados junto con el Cu en los bronce Mayas y presentados en la tabla # A 2.16 son: Fe, Ni, As, Ag, Sn, Sb y Pb. En donde el Cobre varía en un intervalo que va del 82.1% al 99.9%; Son 4 los elementos detectados en todas las piezas Cu, Fe, Ni y Ag.

La metodología propuesta es la apropiada para el análisis de los bronce prehistóricos, no obstante debido a que los rayos de níquel son muy cercanos al pico de absorción del cobalto, usado como absorbedor selectivo en las mediciones, se tiene una incertidumbre sistemática para este elemento, por lo que se propone el uso de un absorbedor no selectivo (168 gm de Al) que podría ser una buena alternativa.

Analizando la tabla A 2.16, se puede observar que la proporción de As – Sn de la mayoría las piezas de la colección de "Las Margaritas" es alrededor del 0.5%, entonces se pueden considerar como bronce, a excepción del cascabel 4, con un porcentaje de 0.42% As - Sn; la aguja 4 con un 0.43% As – Sn; La aguja 6 con un 0.28 % As – Sn; Los restos de metal 1 y 2 con 0.0% y 0.18% de As - Sn respectivamente; la lámina 5 con un 0.47% de As – Sn; y finalmente el fragmento 1 con un 0.0% de As – Sn.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede considerar el método de análisis nuclear PIXE como un procedimiento confiable, preciso, rápido y no destructivo que se puede utilizar a la atmósfera y se puede analizar cualquier región de la pieza sujeta a estudio.

A continuación se hace una discusión de acuerdo a los diagramas ternarios obtenidos.

3.6 Discusión de resultados de acuerdo al tipo de pieza y a la probable región de procedencia.

Para esta sección se llevaron a cabo las normalizaciones de las concentraciones para obtener los diagramas ternarios del apéndice 3.

Analizando el diagrama ternario A 3.1; Fe – Sb – Sn (ver apéndice 3), se puede observar que existe una clara tendencia de las piezas arqueológicas de agruparse hacia el vértice de mayor contenido de estaño, salvo dos cascabeles (4 y 7), una lámina (28), una aguja (19), un resto de metal (22), un fragmento (29) y el hacha (13), debido a la ausencia o a un bajo contenido de antimonio, estas piezas salen de la agrupación general.

En este diagrama se puede deducir que las piezas fueron elaboradas a partir de diferentes tipos de minerales, lo que quiere decir que los fabricantes sabían aproximadamente que propiedades requerían sus artículos, así por ejemplo se observa que los cincenales son de composición muy parecida entre sí, pero diferentes a los cascabeles.

En el diagrama ternario A 3.5 (Sb – As – Sn) se aprecia más claramente esta agrupación por artefactos en donde se localiza una zona en la cual se ubican los cascabeles con una relación As – Sn (tabla 2.16) de 0.42 a 2.7 (el cascabel 8 con un 6.5), otra zona con las agujas con una relación As – Sn que va de 0.27 a 4.3, otra región en el diagrama con los cincenales con una relación del 0.7 al 4.7 de As – Sn, también se aprecia la agrupación de los anillos con una alta relación As – Sn del orden del 13.4 al 15.5, se aprecia que el hacha sale drásticamente del grupo del resto de las piezas ya que al no contener Sn se agrupa junto con la aguja 19, el cascabel 7, la lámina 28, lo que hacen suponer un origen de las piezas distinto.

Utilizando los datos de distintas publicaciones (ver anexo 2) y de acuerdo a los estudios reportadas por diferentes autores, se recopilaron porcentajes de elementos de múltiples piezas analizadas por diversos métodos, con los cuales se pudieron elaborar diagramas ternarios As – Sn – Sb ; utilizando estos diagramas se pudo establecer posibles regiones de procedencia de múltiples piezas y su relación con las piezas de "Las Margaritas" objetos de

este estudio. A continuación se hace una descripción de las regiones de acuerdo al tipo de artefacto.

Cascabeles:

En base a el diagrama ternario (A 3.5) Sb – As – Sn y utilizando los datos de las tablas 1, 2, 3, 4, 5, y 6, se pudo elaborar el diagrama (A 3.6) en donde se ubican los múltiples cascabeles reportados por diversos autores y fue posible establecer áreas perfectamente definidas de procedencia de los cascabeles en el diagrama A 3.7, por ejemplo se pudo definir un área para la zona del Occidente, la cual es muy diferente comparada con la zona Norte, la de mayor dispersión, a su vez se puede delimitar otra zona para la región Maya, que aunque abarca una gran serie de porcentajes de estaño, que van del 10% al 100%, cayendo algunas piezas incluso en la zona del Occidente, se podría considerar una zona específica diferente a la región Occidente y a la zona Norte; también en este diagrama se pudo establecer otra zona muy definida para la región Centro, a pesar de que se cuentan con menos cascabeles reportados.

En cuanto a los cascabeles reportados como especiales [29], no obstante que el análisis cualitativo reportó la presencia de arsénico, no se especificó el motivo por el cual no pudo ser analizado este elemento cuantitativamente, sí embargo es posible que 4 pertenezcan a la zona Maya y 2 provengan de Occidente.

En este diagrama también se puede definir los cascabeles que a pesar de la ubicación de su hallazgo; 2 cascabeles especiales que provienen del Cenote Sagrado, otros 10 cuyo hallazgo se registró en la zona Maya, 2 más cascabeles encontrados en el centro y 1 hallado en la región Norte fueron elaborados en la región del Occidente lo que hace pensar que esta zona fue importante para la elaboración e intercambio de piezas de metal a las demás zonas de Mesoamérica incluida la zona Norte.

En lo que respecta a los cascabeles hallados en "Las Margaritas" observando los diagramas A 3.5 y A 3.6 se puede establecer lo siguiente:

- Los cascabeles 1, 2, 3, 5 y 6 tienen un probable origen Maya y debido al contenido de Sn – As se puede considerar con composiciones semejantes a otros descubiertos en la región (Grinberg-Franco [16]).
- El cascabel 4 también pudo tener su origen en la zona Maya pero debido a que cuenta con menor contenido As – Sn de 0.42% podría ser más temprano.
- El cascabel 7 (tabla 2.16) debido al contenido de As igual a 1.9%, se considera que este bronce arsenical probablemente fue elaborado en la zona Centro, este hecho se encuentra reforzado por el alto contenido de plomo que asciende a un 12.7%, algunos autores [16] consideran que los artículos con un alto contenido de plomo que llegan hasta un 19% de Pb, tienen su origen en la zona Centro del valle de México. Por lo tanto se puede asumir que esta pieza posiblemente fue resultado de un intercambio comercial.
- El anillo de suspensión de cascabel (pieza 8, tabla 2.16), resultado del alto contenido de Sn con un 6.4% se puede ubicar en la zona de Occidente como el sitio donde fue elaborado, esta pieza se ubica en el periodo 2 de la metalurgia según Hosler, y puede ser también producto de intercambio comercial (ver diagrama A 3.7).

Cinceles:

En consecuencia a su contenido de Sn que va de un 0.65% a un 4.3% se consideran como bronce arsenicales (tabla 2.16). Debido a la poca información con respecto a este tipo de artículos no se pudo establecer posibles zona de elaboración pero lo significativo aquí es la composición casi idéntica entre los 4 cinceles y el porcentaje bajo de estaño lo que le confiere una mayor dureza, que es lo que se requiere para este tipo de artefactos. En el diagrama ternario A 3.10 se puede apreciar que los cinceles se agrupan en la misma zona que las agujas y tanto las agujas como los cinceles no tienen procedencia del Occidente, sitio donde si hay registro de algunos artículos. Por lo que se puede presumir que los cinceles tienen su posible origen en la zona Maya o en otra región.

Hachas:

Con los datos de las tablas 2.12 y 2.13 se pudo establecer 2 regiones de elaboración de las hachas (ver diagrama A 3.9), el Hacha (13) recuperada de "Las Margaritas" se puede reconocer como un bronce arsenical con un 1.0% de As, esta pieza se puede suponer que no fue elaborada en la zona de Occidente y más bien parece tener un posible origen en la Zona Sur, que abarca la región de Oaxaca. Esta Hacha se puede considerar como resultado de intercambio comercial.

Agujas:

Analizando el contenido de Sn de las agujas 1, 2, 3, 5 (tabla 2.16) se pueden clasificar como bronce con un porcentaje que va de los 2.27 % a los 4.3%, lo que es suficiente para darles dureza y resistencia, que son propiedades que necesitan las agujas por su uso. Las agujas 4 y 6 debido a su bajo contenido de As – Sn se pueden clasificar como elaboradas en un periodo más temprano que las otras 4,

Analizando el diagrama A 3.10, se puede suponer que sólo la aguja 6, fue elaborada en Occidente y las otras 5 pueden tener una probable procedencia en la zona Maya.

Anillos:

En estos dos anillos (20-21) provenientes de "Las Margaritas" se puede notar un alto contenido de estaño (tabla 2.16) y podría estar de acuerdo a las conclusiones de que los antiguos metalurgistas agregaban altas concentraciones de estaño si buscaban intencionalmente los colores dorados que resultaban al agregar este metal [7]. Analizando el diagrama A 3.8 del apéndice 3, se pueden definir 2 zonas perfectamente delimitadas, una posible región de producción Maya y otra región del Occidente; por el contenido de As- Sn de estos dos anillos que va del 13.4% al 15.5%, se puede considerar a la zona occidental como posible sitio de elaboración.

Restos de Metal:

Los restos de metal (22-23) con una apariencia de metal derretido, debido a su alto contenido de cobre que asciende entre los 99.8% y 99.4% (tabla 2.16), se puede clasificar como cobre nativo, y debido a que su composición no se parece a ninguno de los otros artículos recuperados en "Las Margaritas", se podría suponer que este tipo de cobre se utilizó como materia prima junto con algún otro mineral (ver diagramas A 3.1-A 3.6 del apéndice 3).

Láminas:

De acuerdo al contenido de As-Sn de las láminas 1 a la 4, que va de un 0.7% a un 2.3% (tabla 2.16), y por la similitud en su composición con las hachas y los cascabeles provenientes también de "Las Margaritas" se puede suponer que estos bronceos también tuvieron un posible origen en la zona Maya. En cuanto a la lámina 5 (28) en relación a su bajo contenido de As y nulo contenido de Estaño, esta se clasifica en un periodo más temprano de la metalurgia y quizás con un origen probable en la zona Maya (ver diagrama A 3.5).

Fragmentos:

De acuerdo a la composición del fragmento de cobre 1 (29), bastante parecido al resto de metal 1, se considera que este fragmento proviene de la misma fuente que la pieza 22, es decir, se puede considerar como un metal nativo, (tabla 2.16).

Debido a la similitud de la composición del fragmento de cobre 2 (30) con algunos cascabeles y agujas, se puede considerar como probable origen la zona Maya .

En cuanto al fragmento de cobre 3 (31) de acuerdo a la composición de Sn de 3.3%, se puede ubicar como zona de producción al Occidente de México.

Analizando los resultados de la colección de "Las Margaritas", no fue posible afirmar tal y como se ha propuesto en otros trabajos, que el uso de las

concentraciones de Sn o de As, era para conferir ciertas propiedades de coloración y de sonoridad [7].

En base a los resultados tampoco fue posible aportar algún comentario para el problema del plomo, como fue la propuesta inicial de uno de los objetivos de esta tesis. De las piezas de la colección "Las Margaritas" sólo el cascabel 7 presentó un alto contenido de Pb (12.7%), su origen pudo ser el centro de México, no es posible determinar si tal cantidad de plomo fue agregado para mejorar las condiciones de fundición.

CONCLUSIONES

De acuerdo a la composición de las piezas se puede concluir que los antiguos metalurgistas predeterminaban y controlaban los minerales para elaborar sus artículos dependiendo de la pieza que se quería fabricar. Se puede constatar el uso de arsénico y estaño para dar a las aleaciones ciertas propiedades como dureza y resistencia en el caso de las hachas, los cinceles y las agujas.

Analizando las composiciones de las piezas se puede establecer distintas regiones de probable procedencia de artículos metalúrgicos, sobre todo en los casos de las regiones de Occidente y de la zona Norte, sitios donde si se han recobrado artículos que muestran evidencia de actividad metalúrgica, como pueden ser piedras para la molienda, restos de escorias semifundidas, minerales, trozos de carbón, partes de hornillos o braseros. El caso de la zona Maya es diferente ya que al no existir evidencias de algún taller metalúrgico en la zona, no se puede establecer con certeza a la región Maya como productora de artículos de metal, sin embargo, existen opiniones de algunos autores que afirman que en la zona Maya si se producían artículos metálicos como es el caso de Grinberg y Franco [16]. Según las autoras anteriores, las piezas provenientes de la zona Maya tienen de todos los elementos principalmente arsénico en pequeñas cantidades, por lo tanto se puede decir observando los diagramas A 3.6 y A 3.7, que podría existir una zona de producción Maya, muy diferente a las zonas de Occidente y Norte. La gran diversidad observada en la composición de las piezas de la colección evidencia la presencia de objetos procedentes de diferentes regiones, probablemente debido a un proceso de intercambio y comercio intensivo.

Por otra parte, la mayoría de las piezas rescatadas en los Cimientos de "Las Margaritas" se encontraron en las terrazas inferiores, donde se realizaba la mayor actividad humana y no se encontraron piezas metálicas en los pequeños sitios ceremoniales que se encontraban en las partes superiores del cerro, este hecho contradice la teoría de Hosler [6] que sostiene que los metales sólo estaban restringidos para las élites y funcionarios religiosos, además en relación al tipo de objetos elaborados, se

puede apreciar que los metales no sólo se utilizaron para producir artículos suntuarios, como son cascabeles y anillos, ya que se aprecian más artículos utilitarios como son hachas, cinceles y agujas.

En cuanto al método PIXE, en relación a los objetivos planteados, se cumplieron al utilizar un método analítico no destructivo, capaz de realizar un número importante de análisis en un corto tiempo.

COMENTARIOS FINALES.

Se requiere llevar a cabo un mayor número de análisis de las piezas prehispánicas de bronce de regiones diferentes a la zona de Occidente, empleando técnicas como PIXE que proporcionan directamente una información muy completa de prácticamente todos los elementos que componen las piezas. Este es un problema de estudios previos hechos con absorción atómica, los cuales están en general incompletos, y en muchas ocasiones no permiten llevar a cabo una comparación.

Un mayor conocimiento de la composición de las aleaciones es fundamental para comprender y fundamentar el desarrollo de la metalurgia en Meso-América para comprobar algunas de las hipótesis que se han propuesto para Occidente (color y sonido del metal) y determinar si en efecto se verifican o si es necesario llevar a cabo una revisión de las propuestas existentes.

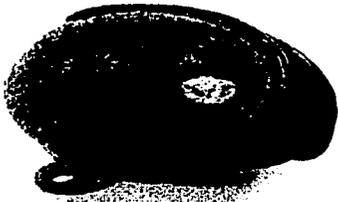
REFERENCIAS.

- [1] Hosler Dorothy, 1994, "La Metalurgia en la Antigua Mesoamérica: Sonidos y Colores del Poder", en Ruiz, Mario H., *Semillas de Industria: Transformaciones de la Tecnología Indígena en las Americas*, CIESAS, México, (1994), pag. 85-97.
- [2] Lothrop, Samuel Kirkland, 1952, "Metals from the Cenote of Sacrifice in Chichén Itzá, Yucatán", *Memoirs of Peabody Museum of Archaeology and Ethnology, Harvard University*, Vol. X, No. 2, (1952).
- [3] Aguilar Piedra, Carlos, "La Orfebrería en el México Precortesiano, *Acta Antropológica* 11:2", INAH, México.(1946)
- [4] Pendergast, David M., *Metal Artifacts in Prehispanic Mesoamerica*, *American Antiquity* 27 (4),1962,pag. 520-545.
- [5] Bray, Warwick, 1977, "Maya Metalwork and its External Connections", in : Hammond, Norman (ed.), *Social process in Mayan Prehistory*, Academic press, London,(1977), pag. 365-403.
- [6] Hosler, Dorothy, "La Tecnología de la Metalurgia Sagrada del Occidente de México", *Arqueología Mexicana*, (1998), pag. 35-45,
- [7] Hosler, Dorothy, "Los Orígenes Andinos de la Metalurgia del Occidente de México", *Boletín Museo del Oro*, No 42, Enero-Junio 1997, Bogota Colombia, pag. 1-25.
- [8] Palmer J. W., Hollander M. G., Rogers P. S. Z., Benjamin T. M., Duffy C. J., Lambert J. B. and Brown J. A., "Pre-Columbian Metallurgy: Technology, Manufacture, and Microprobe Analyses of Copper Bells From the Greater Southwest", *Archaeometry* 40, 2 (1998), Great Britain, pag. 361-382.
- [9] Krasnopolsky de Grinberg Dora, "Tecnologías Minero-Metalúrgicas Purépechas", en Mesa Redonda Tecnologías Metalúrgicas en América Prehispánica, U.N.A.M., (2001), pag. 53-70.
- [10] Hosler, Dorothy y A. Macfarlane, "Copper sources, metal production and metals trade in late Postclassic Mesoamerica", *Science* número 257, (1996), pag.1819-1824.
- [11] Anónimo,"Relación de las ceremonias y ritos y población y gobierno de los indios de la provincia de Michoacán".(1541),Reproducción Facsimil, Morelia, Michoacán, 1977,México, pag. 277.
- [12] Salas G., Ramírez J., Noguez Ma. E. Y Robert T., "Aleaciones y Objetos Metálicos Mesoamericanos Aspectos Importantes", en Mesa Redonda Tecnologías Metalúrgicas en América Prehispánica, U.N.A.M.(2001), pag. 141-165.
- [13] Ziobrowski C., Cabanillas E., Palacios T. Y Gonzalez L., "Estudio de Aleaciones Cobre- Arsénico", *Boletín Museo del Oro* # 41, Julio-Diciembre 1996, pags. 130-143.

- [14] Vetter P. Luisa, "El uso del cobre arsenical en las culturas prehispánicas del Norte de Perú", Boletín Museo del Oro # 41, Julio-Diciembre, 1996, pags., 63-81.
- [15] Lechtman Heather, "El Bronce y el Horizonte Medio", Boletín Museo del Oro # 41, Julio-Diciembre, 1996, pags., 3-25.
- [16] D. M. K. De Grinberg Y F. Franco, "Estudio Químico y Metalúrgico de los Objetos de metal de Tonina, Chiapas", en Becquelin, Pierre and Claude F. Baudez, Tonina, une cité Maya du Chiapas, Tomo III, Collection Etudes Mésoaméricaines, París, (1982), pag. 1143-1161.
- [17] Schulze, Niklas, "An Experimental Experiment: Production Technology and Properties of Mexican Copper (Alloy) Bells", Department of Archarlogical Science, University of Bradford, Master Dissartation: (1999).
- [18] Knauth Percy, 1983, "El Descubrimiento de los Metales", Ediciones Culturales Internacionales, (1983), páginas 138-139.
- [19] Ruvalcaba J. L., "Estudios Arqueométricos mediante las Técnicas PIXE y RBS", Antropología y Técnica, Arqueometría IIA -U. N. A. M.7 (2001). En prensa.
- [20] Miranda J., "Técnicas Analíticas de Origen Nuclear: un Curso Introductorio", Instituto de física UNAM, México, (2000).
- [21] Monroy P. Marel B., Tesis de Licenciatura en Física, "Caracterización y Aplicación de un Dispositivo de Haz Externo para Análisis Mediante PIXE" Facultad de Ciencias UNAM, México, (2002).
- [22] Ruvalcaba Sil José Luis y Miranda J, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, Vol. 109-110, (1996), pag. 121-124.
- [23] Salgado Escobar Alicia, Tesis de licenciatura en Química de alimentos, "Aplicación de PIXE al Análisis de Alimentos: Chocolate y Azúcar, Facultad de Química, UNAM, 2001, páginas 29 - 31.
- [24] Ruvalcaba - Sil J. L., Demortier G. Y Oliver A., " External beam analysis of gold pre-hispanic jewelry items international journal of PIXE, 5, 1995, pag. 273.
- [25] Demortier Guy, "Applications of ion Beam Analysis Techniques to Arts and Archeometry" Editors- M.A. Respaldiza and J. Gomez Camacho, 198, Sevilla, páginas 91- 114.
- [26] Demortier G., Ruvalcaba- Sil, Differential PIXE analyses of Mesoamerican Jewelry Items Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B118, 1996, P125.
- [27] Ruvalcaba- Sil J. L. y Ortiz E., "Non -destructive study of a gold pectoral from Oaxaca, Mexico, using PIXE and RBS techniques", Founders, Smiths and Platers, International conference Metal Forming from the Earliest Times Oxford, U. K. (1998) To be print in British Archaeological reports.
- [28] Méndez Mejía Ursula, " Técnicas nucleares y Convencionales Aplicadas al Análisis de Metales Purépechas de la Colección

- Pareyón" Tesis de Licenciatura en Arqueología, ENAH, INAH, México, 1999.
- [29] Álvarez A. Carlos, "El Patrón de Asentamiento en las Margaritas Chiapas", U. N. A. M., 2000.
- [30] Franco V. F. Y D. M. De Grinberg, "Cascabeles Especiales Procedentes del Cenote Sagrado de Chichén-Itzá, Yucatán", en Mesa Redonda Tecnologías Metalúrgicas en América Prehispánica, U. N. A. M., (2001), pag.17-32.
- [31] Dorothy Hosler, "The Sounds and Colors of Power". The Sacred Metallurgical Technology of Ancient West Mexico, MIT Press, Cambridge, 1994.

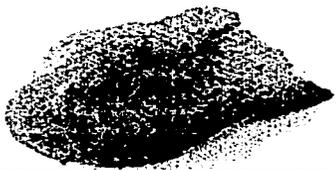
APENDICE 1
PIEZAS ARQUEOLÓGICAS

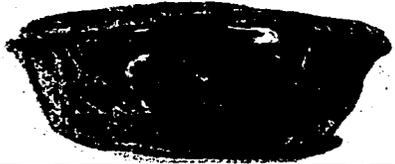
<p>TIPO DE OBJETO</p> <p>(1) Cascabel de Cobre</p>	<p>CLAVE COB-41</p>																	
<p>DIMENSIONES</p> <p>DIÁMETRO: 4 cm.</p>																		
<p>CONTEXTO</p> <p>Donación, se encontró en la orilla noroeste del sitio Cimientos (M-II-19), localizado en pequeñas islas de la antigua ciénega de las Margaritas, correspondiente al periodo Posclásico o Spowil (1000-1550 D.C.).</p>																		
<p>DESCRIPCION</p> <p>Cascabel elaborado por el método de "cera perdida", tiene argolla simple, perpendicular a la boca y reborde alrededor de ella. Cascabel esférico estilo "A" según Lothrop y del tipo 1A2a según Pendergast.</p>		<p>RESULTADOS DEL ANALISIS</p> <table border="0"> <tr><td>%Fe =</td><td>0.050</td></tr> <tr><td>%Ni =</td><td>0.045</td></tr> <tr><td>%Cu=</td><td>97.6</td></tr> <tr><td>%As =</td><td>0.830</td></tr> <tr><td>%Ag =</td><td>0.091</td></tr> <tr><td>%Sn =</td><td>0.785</td></tr> <tr><td>%Sb =</td><td>0.187</td></tr> <tr><td>%Pb =</td><td>0.459</td></tr> </table>	%Fe =	0.050	%Ni =	0.045	%Cu=	97.6	%As =	0.830	%Ag =	0.091	%Sn =	0.785	%Sb =	0.187	%Pb =	0.459
%Fe =	0.050																	
%Ni =	0.045																	
%Cu=	97.6																	
%As =	0.830																	
%Ag =	0.091																	
%Sn =	0.785																	
%Sb =	0.187																	
%Pb =	0.459																	

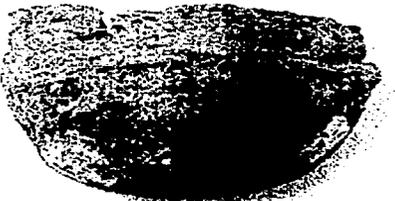
<p>TIPO DE OBJETO</p> <p>(2) Cascabel 2, tipo "falsa filigrana".</p>	<p>CLAVE COM-14</p>																	
<p>DIMENSIONES</p> <p>1.8 cm Ancho, 2 cm Altura.</p>																		
<p>CONTEXTO</p> <p>Fragmento encontrado el 15-II-95 en el pozo 1 de la antigua ciénega de las Margaritas.</p>																		
<p>DESCRIPCION</p> <p>Fragmento de cascabel del tipo "falsa filigrana" de color verde, con una argolla de suspensión integrada al mismo cuerpo del cascabel. Cascabel del tipo "F" según Lothrop y del tipo 8d según Hosler.</p>		<p>RESULTADOS DEL ANALISIS</p> <table border="0"> <tr><td>%Fe =</td><td>0.244</td></tr> <tr><td>%Ni =</td><td>0.217</td></tr> <tr><td>%Cu=</td><td>98.0</td></tr> <tr><td>%As =</td><td>0.590</td></tr> <tr><td>%Ag =</td><td>0.065</td></tr> <tr><td>%Sn =</td><td>0.775</td></tr> <tr><td>%Sb =</td><td>0.150</td></tr> <tr><td>%Pb =</td><td>0.000</td></tr> </table>	%Fe =	0.244	%Ni =	0.217	%Cu=	98.0	%As =	0.590	%Ag =	0.065	%Sn =	0.775	%Sb =	0.150	%Pb =	0.000
%Fe =	0.244																	
%Ni =	0.217																	
%Cu=	98.0																	
%As =	0.590																	
%Ag =	0.065																	
%Sn =	0.775																	
%Sb =	0.150																	
%Pb =	0.000																	

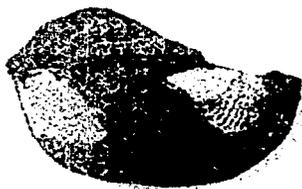
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

TIPO DE OBJETO	CLAVE B-74	2	3	
(3) Cascabel 3, esférico.				
DIMENSIONES				
Ancho 2.4 cm; 1.2 cm Alto; Anillo de suspensión 0.5 cm de diámetro.				
CONTEXTO				
Fragmento encontrado el 10-IV-97 en la orilla oeste del asentamiento "Cimientos de las Margaritas".		RESULTADOS DEL ANALISIS		
DESCRIPCION		%Fe = 0.160		
		%Ni = 0.142		
		%Cu= 97.8		
		%As = 0.860		
		%Ag = 0.072		
		%Sn = 0.405		
%Sb = 0.116				
%Pb = 0.403				

TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-26	1	2	
(4) Fragmento de cascabel de cobre 4.				
DIMENSIONES				
1.5 Ancho; 1.8 cm Alto.				
CONTEXTO				
Fragmento de cascabel de cobre encontrado el 02-III-95 en el patio de los Cimientos de las Margaritas.		RESULTADOS DEL ANALISIS		
DESCRIPCION		%Fe = 0.174		
		%Ni = 0.152		
		%Cu= 99.2		
		%As = 0.380		
		%Ag = 0.027		
		%Sn = 0.042		
%Sb = 0.030				
%Pb = 0.000				

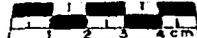
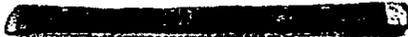
TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-35																	
(5) Medio cascabel.																		
DIMENSIONES		<p>RESULTADOS DEL ANALISIS</p> <table> <tr><td>%Fe =</td><td>0.435</td></tr> <tr><td>%Ni =</td><td>0.363</td></tr> <tr><td>%Cu =</td><td>96.1</td></tr> <tr><td>%As =</td><td>1.320</td></tr> <tr><td>%Ag =</td><td>0.156</td></tr> <tr><td>%Sn =</td><td>1.430</td></tr> <tr><td>%Sb =</td><td>0.247</td></tr> <tr><td>%Pb =</td><td>0.000</td></tr> </table>	%Fe =	0.435	%Ni =	0.363	%Cu =	96.1	%As =	1.320	%Ag =	0.156	%Sn =	1.430	%Sb =	0.247	%Pb =	0.000
%Fe =	0.435																	
%Ni =	0.363																	
%Cu =	96.1																	
%As =	1.320																	
%Ag =	0.156																	
%Sn =	1.430																	
%Sb =	0.247																	
%Pb =	0.000																	
CONTEXTO																		
Cascabel encontrado en el lado este, el 11/ III / 95, en el sitio Cimientos, de las Margaritas, correspondiente al periodo posclásico (1000-1550 D.C.).																		
DESCRIPCION																		
Medio cascabel de cobre, al cual no tiene argolla para sujetarlo, tiene una capa de óxido color verde.																		

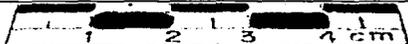
TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-30																	
(6) Fragmento de cascabel 1.																		
DIMENSIONES		<p>RESULTADOS DEL ANALISIS</p> <table> <tr><td>%Fe =</td><td>0.191</td></tr> <tr><td>%Ni =</td><td>0.173</td></tr> <tr><td>%Cu =</td><td>98.0</td></tr> <tr><td>%As =</td><td>0.714</td></tr> <tr><td>%Ag =</td><td>0.088</td></tr> <tr><td>%Sn =</td><td>0.684</td></tr> <tr><td>%Sb =</td><td>0.125</td></tr> <tr><td>%Pb =</td><td>0.000</td></tr> </table>	%Fe =	0.191	%Ni =	0.173	%Cu =	98.0	%As =	0.714	%Ag =	0.088	%Sn =	0.684	%Sb =	0.125	%Pb =	0.000
%Fe =	0.191																	
%Ni =	0.173																	
%Cu =	98.0																	
%As =	0.714																	
%Ag =	0.088																	
%Sn =	0.684																	
%Sb =	0.125																	
%Pb =	0.000																	
CONTEXTO																		
Fragmento encontrado el 20-II-95 en el pozo 2 de los Cimientos de las Margaritas.																		
DESCRIPCION																		
Fragmento de cascabel de cobre de forma cóncava, de color verduzco y con una capa de óxido.																		

TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-34																	
<p>(7) Cascabel de cobre fragmentado 2.</p>																		
<p>DIMENSIONES</p> <p>1.5 cm Ancho; 1.1cm Alto.</p>																		
<p>CONTEXTO</p> <p>Fragmento encontrado el 01-III-95 en el lado este de los Cimientos de las Margaritas.</p>																		
<p>DESCRIPCION</p> <p>Cascabel de cobre fragmentado de forma cóncava con una ligera capa de óxido.</p>		<p>RESULTADOS DEL ANALISIS</p> <table> <tr><td>%Fe =</td><td>0.032</td></tr> <tr><td>%Ni =</td><td>0.025</td></tr> <tr><td>%Cu =</td><td>85.0</td></tr> <tr><td>%As =</td><td>1.96</td></tr> <tr><td>%Ag =</td><td>0.168</td></tr> <tr><td>%Sn =</td><td>0.014</td></tr> <tr><td>%Sb =</td><td>0.139</td></tr> <tr><td>%Pb =</td><td>12.7</td></tr> </table>	%Fe =	0.032	%Ni =	0.025	%Cu =	85.0	%As =	1.96	%Ag =	0.168	%Sn =	0.014	%Sb =	0.139	%Pb =	12.7
%Fe =	0.032																	
%Ni =	0.025																	
%Cu =	85.0																	
%As =	1.96																	
%Ag =	0.168																	
%Sn =	0.014																	
%Sb =	0.139																	
%Pb =	12.7																	

TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-29																	
<p>(8) Anillo de suspensión de un cascabel.</p>																		
<p>DIMENSIONES</p> <p>0.5 Diámetro.</p>																		
<p>CONTEXTO</p> <p>Argolla pequeña encontrada el 08- III- 95 en el lado este de los Cimientos de Las Margaritas.</p>																		
<p>DESCRIPCION</p> <p>Pequeña argolla aparentemente usada como suspensión de un cascabel de cobre.</p>		<p>RESULTADOS DEL ANALISIS</p> <table> <tr><td>%Fe =</td><td>0.102</td></tr> <tr><td>%Ni =</td><td>0.085</td></tr> <tr><td>%Cu =</td><td>93.2</td></tr> <tr><td>%As =</td><td>0.068</td></tr> <tr><td>%Ag =</td><td>0.012</td></tr> <tr><td>%Sn =</td><td>6.468</td></tr> <tr><td>%Sb =</td><td>0.012</td></tr> <tr><td>%Pb =</td><td>0.041</td></tr> </table>	%Fe =	0.102	%Ni =	0.085	%Cu =	93.2	%As =	0.068	%Ag =	0.012	%Sn =	6.468	%Sb =	0.012	%Pb =	0.041
%Fe =	0.102																	
%Ni =	0.085																	
%Cu =	93.2																	
%As =	0.068																	
%Ag =	0.012																	
%Sn =	6.468																	
%Sb =	0.012																	
%Pb =	0.041																	

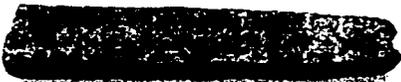
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

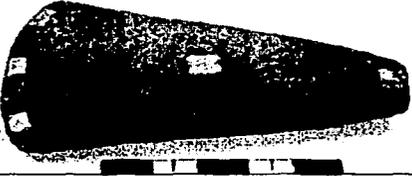
TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-25																	
(9) Cincel de cobre 1.																		
DIMENSIONES 10 cm Largo; 1.1 cm Ancho; 0.5 cm Espesor.																		
CONTEXTO Cincel de cobre encontrado el 06-II-95 en la superficie del Cimiento 7 de las Margaritas.		<p>RESULTADOS DEL ANALISIS</p> <table border="0"> <tr><td>%Fe =</td><td>0.012</td></tr> <tr><td>%Ni =</td><td>0.017</td></tr> <tr><td>%Cu =</td><td>98.3</td></tr> <tr><td>%As =</td><td>0.184</td></tr> <tr><td>%Ag =</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>%Sn =</td><td>1.276</td></tr> <tr><td>%Sb =</td><td>0.070</td></tr> <tr><td>%Pb =</td><td>0.041</td></tr> </table>	%Fe =	0.012	%Ni =	0.017	%Cu =	98.3	%As =	0.184	%Ag =	0.080	%Sn =	1.276	%Sb =	0.070	%Pb =	0.041
%Fe =	0.012																	
%Ni =	0.017																	
%Cu =	98.3																	
%As =	0.184																	
%Ag =	0.080																	
%Sn =	1.276																	
%Sb =	0.070																	
%Pb =	0.041																	
DESCRIPCION Cincel aplanado en ambos extremos con una capa de óxido de color café.																		

TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-36																	
(10) Cincel de cobre 2.																		
DIMENSIONES 5 cm Largo; 0.9 cm Ancho; 0.3 cm Espesor.																		
CONTEXTO Cincel encontrado el 27-V-93 en el lado oeste de los Cimientos las Margaritas.		<p>RESULTADOS DEL ANALISIS</p> <table border="0"> <tr><td>%Fe =</td><td>0.020</td></tr> <tr><td>%Ni =</td><td>0.017</td></tr> <tr><td>%Cu =</td><td>99.2</td></tr> <tr><td>%As =</td><td>0.061</td></tr> <tr><td>%Ag =</td><td>0.038</td></tr> <tr><td>%Sn =</td><td>0.655</td></tr> <tr><td>%Sb =</td><td>0.013</td></tr> <tr><td>%Pb =</td><td>0.040</td></tr> </table>	%Fe =	0.020	%Ni =	0.017	%Cu =	99.2	%As =	0.061	%Ag =	0.038	%Sn =	0.655	%Sb =	0.013	%Pb =	0.040
%Fe =	0.020																	
%Ni =	0.017																	
%Cu =	99.2																	
%As =	0.061																	
%Ag =	0.038																	
%Sn =	0.655																	
%Sb =	0.013																	
%Pb =	0.040																	
DESCRIPCION Cincel con una ligera capa de óxido con un extremo más puntiagudo que el otro.																		

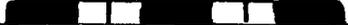
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-15																	
(11) Cincel de cobre 3.		1 2 3 4 cm																
DIMENSIONES 4.1 cm Largo; 0.7 cm Ancho; 03 cm Espesor.																		
CONTEXTO Punzón encontrado el 03-III-95 en el lado oeste del Cimiento de las Margaritas.		RESULTADOS DEL ANALISIS																
DESCRIPCION Punzón con un extremo más puntiagudo que el otro, cubierto con una capa rojiza de óxido		<table> <tr><td>%Fe =</td><td>0.015</td></tr> <tr><td>%Ni =</td><td>0.013</td></tr> <tr><td>%Cu =</td><td>95.1</td></tr> <tr><td>%As =</td><td>0.387</td></tr> <tr><td>%Ag =</td><td>0.071</td></tr> <tr><td>%Sn =</td><td>4.327</td></tr> <tr><td>%Sb =</td><td>0.103</td></tr> <tr><td>%Pb =</td><td>0.000</td></tr> </table>	%Fe =	0.015	%Ni =	0.013	%Cu =	95.1	%As =	0.387	%Ag =	0.071	%Sn =	4.327	%Sb =	0.103	%Pb =	0.000
%Fe =	0.015																	
%Ni =	0.013																	
%Cu =	95.1																	
%As =	0.387																	
%Ag =	0.071																	
%Sn =	4.327																	
%Sb =	0.103																	
%Pb =	0.000																	

TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-17																	
(12) Cincel 4.		1 2																
DIMENSIONES 2.2 cm. Largo; 5 mm ancho; 3 mm espesor.																		
CONTEXTO Punta de cincel encontrada en el lado oeste el 15-II- 95 en los Cimientos de Las Margaritas.		RESULTADOS DEL ANALISIS																
DESCRIPCION Punta de cincel de color rojizo encontrada junto a restos de metal de cobre.		<table> <tr><td>%Fe =</td><td>0.028</td></tr> <tr><td>%Ni =</td><td>0.024</td></tr> <tr><td>%Cu =</td><td>96.6</td></tr> <tr><td>%As =</td><td>0.380</td></tr> <tr><td>%Ag =</td><td>0.060</td></tr> <tr><td>%Sn =</td><td>2.765</td></tr> <tr><td>%Sb =</td><td>0.099</td></tr> <tr><td>%Pb =</td><td>0.000</td></tr> </table>	%Fe =	0.028	%Ni =	0.024	%Cu =	96.6	%As =	0.380	%Ag =	0.060	%Sn =	2.765	%Sb =	0.099	%Pb =	0.000
%Fe =	0.028																	
%Ni =	0.024																	
%Cu =	96.6																	
%As =	0.380																	
%Ag =	0.060																	
%Sn =	2.765																	
%Sb =	0.099																	
%Pb =	0.000																	

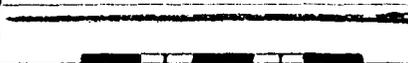
TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-6	
<p>(13) Hacha de cobre.</p>		
<p>DIMENSIONES</p> <p>4 cm Ancho; 8.5 cm Alto; 0.8 cm espesor.</p>		
<p>CONTEXTO</p> <p>Hacha encontrada el 18-IV- 97 en la orilla oeste de los cimientos de Las Margaritas.</p>		<p>RESULTADOS DEL ANALISIS</p> <p>%Fe = 0.088 %Ni = 0.076 %Cu = 98.7 %As = 1.067 %Ag = 0.033 %Sn = 0.000 %Sb = 0.087 %Pb = 0.000</p>
<p>DESCRIPCION</p> <p>Hacha cubierta con una capa de óxido color verdusco, pieza metálica sólida.</p>		

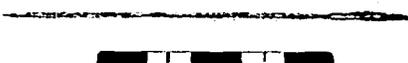
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TIPO DE OBJETO (14) Aguja de cobre 1.	CLAVE COM-22	
DIMENSIONES 6.5 cm Largo; 0.2 cm ancho.		
CONTEXTO Aguja encontrada el 25-II-95 en el lado oeste del Cimiento de Las Margaritas.		
DESCRIPCION Aguja de cobre fabricada por martilleo un alambre largo se aplana una punta y se hace la perforación del ojo, empleando probablemente un cincel.		RESULTADOS DEL ANALISIS %Fe = 0.058 %Ni = 0.050 %Cu= 96.4 %As = 0.210 %Ag = 0.091 %Sn = 3.09 %Sb = 0.085 %Pb = 0.000

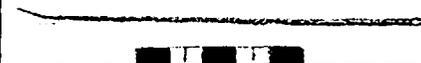
TIPO DE OBJETO (15) Aguja de cobre 2.	CLAVE COM-19	
DIMENSIONES 7.2 cm Largo; 0.2 cm Ancho.		
CONTEXTO Aguja encontrada el 09-III-95 el lado oeste del Cimiento 75 de Las Margaritas.		
DESCRIPCION Aguja de cobre elaborada por martilleo y con perforación hecha con cincel.		RESULTADOS DEL ANALISIS %Fe = 0.031 %Ni = 0.026 %Cu= 95.1 %As = 0.457 %Ag = 0.125 %Sn = 3.900 %Sb = 0.298 %Pb = 0.072

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

TIPO DE OBJETO (16) Aguja de cobre 3.	CLAVE COM-14	
DIMENSIONES 7.8 cm Largo; 0.1 cm espesor.		
CONTEXTO Aguja encontrada el 02-III-95 en la orolla norte del Cimiento de Las Margaritas.		RESULTADOS DEL ANALISIS %Fe = 0.035 %Ni = 0.030 %Cu= 96.7 %As = 0.655 %Ag = 0.068 %Sn = 2.43 %Sb = 0.097 %Pb = 0.000
DESCRIPCION Aguja de cobre elaborada por martilleo y con perforación en un extremo.		

TIPO DE OBJETO (17) Aguja de cobre 4.	CLAVE COM-20	
DIMENSIONES 9.1 cm Largo; 0.3 cm Espesor..		
CONTEXTO Aguja encontrada el 18-II-95 en el relleno del patio del Cimiento de Las Margaritas.		RESULTADOS DEL ANALISIS %Fe = 0.025 %Ni = 0.023 %Cu= 99.4 %As = 0.121 %Ag = 0.072 %Sn = 0.313 %Sb = 0.044 %Pb = 0.000
DESCRIPCION Aguja de cobre elaborada por martilleo con perforación en un extremo.		

TIPO DE OBJETO (18) Aguja de cobre 5.	CLAVE COM-24	
DIMENSIONES 10.2 cm de Largo; 0.3 cm espesor.		
CONTEXTO Aguja de cobre encontrada asociada a una palizada en la orilla norte de los Cimientos de Las Margaritas.		RESULTADOS DEL ANALISIS %Fe = 0.040 %Ni = 0.035 %Cu = 97.5 %As = 0.280 %Ag = 0.104 %Sn = 2.00 %Sb = 0.082 %Pb = 0.000
DESCRIPCION Aguja de cobre elaborada por martilleo aplanada en un extremo, con un agujero a 1 cm de la orilla y con el otro extremo que termina en punta.		

TIPO DE OBJETO (19) Aguja de cobre 6..	CLAVE COM-21	
DIMENSIONES 12.7 cm de Largo; 1 cm espesor.		
CONTEXTO Aguja encontrada en el lado norte de los Cimientos de Las Margaritas.		RESULTADOS DEL ANALISIS %Fe = 0.030 %Ni = 0.025 %Cu = 99.6 %As = 0.280 %Ag = 0.039 %Sn = 0.000 %Sb = 0.033 %Pb = 0.000
DESCRIPCION Aguja de cobre extremadamente larga y muy delgada, elaborada por martilleo y con un extremo aplanado con una perforación, y en el otro extremo con terminación en punta.		

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TIPO DE OBJETO (20) Fragmento de anillo de cobre 1.	CLAVE COM-16	2 3 4 CT
DIMENSIONES 2.6 Largo; 0.9 cm Ancho.		
CONTEXTO Fragmento encontrado el 17-III-95 en el patio de los Cimientos de Las Margaritas.		RESULTADOS DEL ANALISIS %Fe = 0.061 %Ni = 0.050 %Cu = 86.1 %As = 0.563 %Ag = 0.118 %Sn = 12.90 %Sb = 0.164 %Pb = 0.000
DESCRIPCION Parte de un anillo con perforaciones triangulares aparentemente hechas con un punzón.		

TIPO DE OBJETO (21) Anillo de cobre 2.	CLAVE COM-4	1 2 3 4 C
DIMENSIONES 1.1 cm Ancho; 1.5 cm Diámetro aproximadamente.		
CONTEXTO Anillo encontrado el 14-IV-97 en la orilla oeste de los Cimientos de Las Margaritas.		RESULTADOS DEL ANALISIS %Fe = 1.034 %Ni = 0.914 %Cu = 82.1 %As = 0.442 %Ag = 0.082 %Sn = 15.13 %Sb = 0.117 %Pb = 0.144
DESCRIPCION Anillo de cobre completo fragmentado en dos partes, anillo liso cuya superficie exterior es convexa y la interior es cóncava.		

TIPO DE OBJETO	CLAVE COB-3	
(22) Resto de metal 1.		
DIMENSIONES		
3.9 cm Largo; 0.6 cm Ancho.		
CONTEXTO		RESULTADOS DEL ANALISIS
Metal encontrado el 17-IV-97 en la orilla oeste del asentamiento de Las Margaritas.		%Fe = 0.087
		%Ni = 0.076
		%Cu = 99.8
		%As = 0.000
		%Ag = 0.043
		%Sn = 0.000
		%Sb = 0.000
		%Pb = 0.000
DESCRIPCION		
Metal derretido en forma de racimo, con una capa de óxido.		

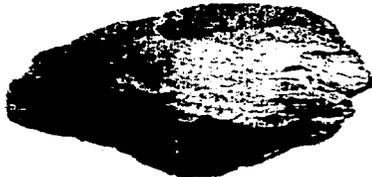
TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-17	
(23) Resto de metal 2		
DIMENSIONES		
Metal derretido = 2 cm Largo; 0.9 Ancho..		
CONTEXTO		RESULTADOS DEL ANALISIS
Metales encontrados juntos el 15-II-95 en el lado oeste de los Cimientos de Las Margaritas.		%Fe = 0.028
		%Ni = 0.023
		%Cu = 99.4
		%As = 0.063
		%Ag = 0.066
		%Sn = 0.114
		%Sb = 0.152
		%Pb = 0.106
DESCRIPCION		
Metales encontrados juntos uno tiene forma de racimo y el otro semeja la punta de un punzón.		

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-32	
(24) Lámina de cobre 1.		
DIMENSIONES		
1.5 cm Alto, 1 cm Ancho.		<p>RESULTADOS DEL ANALISIS</p> <p>%Fe = 0.025 %Ni = 0.021 %Cu = 97.2 %As = 0.517 %Ag = 0.139 %Sn = 1.80 %Sb = 0.278 %Pb = 0.000</p>
CONTEXTO		
Fragmento de cobre encontrado el 16-III-95 en la orilla norte de los Cimientos de Las Margaritas.		
DESCRIPCION		
Fragmento cubierto con una ligera capa de óxido con un tono verde.		

TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-31	
(25) Lámina de cobre 2.		
DIMENSIONES		
2.6 cm Ancho; 2.0 cm Alto.		<p>RESULTADOS DEL ANALISIS</p> <p>%Fe = 0.030 %Ni = 0.025 %Cu = 98.3 %As = 0.210 %Ag = 0.121 %Sn = 1.28 %Sb = 0.062 %Pb = 0.000</p>
CONTEXTO		
Lámina de cobre encontrada el 07- III- 95 en el relleno de la orilla norte de los Cimientos de Las Margaritas.		
DESCRIPCION		
Lámina de cobre cubierta de una capa de óxido poroso de color verduzco.		

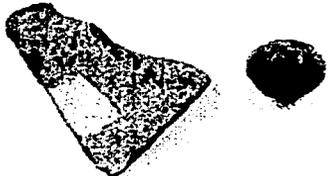
TESTE COM
FALLA DE ORIGEN

TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-30	
(26) Lámina de cobre 3.		
DIMENSIONES	0.8 cm Ancho; 1.3 cm Alto	
CONTEXTO	Pieza encontrada el 03- VI- 93 en el lado oeste de los Cimientos de Las Margaritas	
DESCRIPCION	Pequeña laminilla de cobre con una ligera capa de óxido.	RESULTADOS DEL ANALISIS %Fe = 0.021 %Ni = 0.017 %Cu = 98.8 %As = 0.156 %Ag = 0.054 %Sn = 0.580 %Sb = 0.063 %Pb = 0.263

TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-27	
(26) Lámina de cobre 4.		
DIMENSIONES	1.3 cm Ancho; 1.0 Alto..	
CONTEXTO	Fragmento encontrado el 15- III- 95 en el lado oeste de los Cimientos de Las Margaritas.	
DESCRIPCION	Fragmento de lámina de cobre de forma triangular con una ligera capa de óxido.	RESULTADOS DEL ANALISIS %Fe = 0.014 %Ni = 0.012 %Cu = 97.8 %As = 0.507 %Ag = 0.056 %Sn = 1.483 %Sb = 0.094 %Pb = 0.000

TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-5	
(26) Lámina de cobre 5.		
DIMENSIONES		
CONTEXTO	RESULTADOS DEL ANALISIS %Fe = 0.018 %Ni = 0.016 %Cu = 99.5 %As = 0.468 %Ag = 0.011 %Sn = 0.000 %Sb = 0.021 %Pb = 0.000	
DESCRIPCION		

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-28																	
<p>(29) Fragmento de cobre 1.</p>																		
<p>DIMENSIONES Cobre = 1.2 cm Ancho; 1.5 Alto. Caracol = 0.5 cm Diámetro.</p>																		
<p>CONTEXTO Piezas encontradas en el lado oeste de los Cimientos de Las Margaritas.</p>		<p>RESULTADOS DEL ANALISIS</p> <table data-bbox="800 425 1029 607"> <tr><td>%Fe =</td><td>0.013</td></tr> <tr><td>%Ni =</td><td>0.011</td></tr> <tr><td>%Cu =</td><td>99.9</td></tr> <tr><td>%As =</td><td>0.000</td></tr> <tr><td>%Ag =</td><td>0.047</td></tr> <tr><td>%Sn =</td><td>0.000</td></tr> <tr><td>%Sb =</td><td>0.000</td></tr> <tr><td>%Pb =</td><td>0.000</td></tr> </table>	%Fe =	0.013	%Ni =	0.011	%Cu =	99.9	%As =	0.000	%Ag =	0.047	%Sn =	0.000	%Sb =	0.000	%Pb =	0.000
%Fe =	0.013																	
%Ni =	0.011																	
%Cu =	99.9																	
%As =	0.000																	
%Ag =	0.047																	
%Sn =	0.000																	
%Sb =	0.000																	
%Pb =	0.000																	
<p>DESCRIPCION Cobre encontrado asociado a un caracol, la pieza de cobre tiene forma de laminilla con una ligera capa de óxido.</p>																		

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-2																	
<p>(30) Fragmento de cobre 2.</p>																		
<p>DIMENSIONES</p> <p>1.5 cm Largo; 0.5 cm Ancho.</p>																		
<p>CONTEXTO</p> <p>Fragmento de laminilla de cobre encontrada el 27-II-95 en el lado oeste de los Cimientos de Las Margaritas.</p>																		
<p>DESCRIPCION</p> <p>Fragmento de laminilla de cobre enrollada no se puede precisar al objeto del que procede, de color verduzco por la capa de óxido.</p>		<p>RESULTADOS DEL ANALISIS</p> <table border="0"> <tr><td>%Fe =</td><td>0.050</td></tr> <tr><td>%Ni =</td><td>0.034</td></tr> <tr><td>%Cu =</td><td>98.6</td></tr> <tr><td>%As =</td><td>0.836</td></tr> <tr><td>%Ag =</td><td>0.016</td></tr> <tr><td>%Sn =</td><td>0.000</td></tr> <tr><td>%Sb =</td><td>0.281</td></tr> <tr><td>%Pb =</td><td>0.182</td></tr> </table>	%Fe =	0.050	%Ni =	0.034	%Cu =	98.6	%As =	0.836	%Ag =	0.016	%Sn =	0.000	%Sb =	0.281	%Pb =	0.182
%Fe =	0.050																	
%Ni =	0.034																	
%Cu =	98.6																	
%As =	0.836																	
%Ag =	0.016																	
%Sn =	0.000																	
%Sb =	0.281																	
%Pb =	0.182																	

TIPO DE OBJETO	CLAVE COM-18																	
<p>(31) Fragmento de cobre 3.</p>																		
<p>DIMENSIONES</p> <p>Fragmento de cobre = 1.3 cm Largo; 0.6 cm Ancho ; Punta de cobre =1.6 cm Largo; 0.3 cm ancho.</p>																		
<p>CONTEXTO</p> <p>Piezas encontrados el 17- II- 95 en el lado oeste de los Cimientos de Las Margaritas.</p>																		
<p>DESCRIPCION</p> <p>Fragmento de lámina de cobre encontrada junto con una punta de cobre aparentemente perteneciente a un punzón.</p>		<p>RESULTADOS DEL ANALISIS</p> <table border="0"> <tr><td>%Fe =</td><td>0.021</td></tr> <tr><td>%Ni =</td><td>0.017</td></tr> <tr><td>%Cu =</td><td>96.5</td></tr> <tr><td>%As =</td><td>0.340</td></tr> <tr><td>%Ag =</td><td>0.081</td></tr> <tr><td>%Sn =</td><td>3.003</td></tr> <tr><td>%Sb =</td><td>0.084</td></tr> <tr><td>%Pb =</td><td>0.000</td></tr> </table>	%Fe =	0.021	%Ni =	0.017	%Cu =	96.5	%As =	0.340	%Ag =	0.081	%Sn =	3.003	%Sb =	0.084	%Pb =	0.000
%Fe =	0.021																	
%Ni =	0.017																	
%Cu =	96.5																	
%As =	0.340																	
%Ag =	0.081																	
%Sn =	3.003																	
%Sb =	0.084																	
%Pb =	0.000																	

APENDICE 2

TABLAS

APENDICE 2

Contenido

Tabla A.2.1.-Zona Maya; Artefactos:Cascabeles
Tabla A.2.1(Continuación.)-Zona Maya; Artefactos:Cascabeles
Tabla A.2.2.-Zona Centro; Artefactos:Cascabeles
Tabla A.2.3.-Zona Occidente; Artefactos:Cascabeles
Tabla A.2.4.-Zona Sur; Artefactos:Cascabeles
Tabla A.2.5.-Zona Del Golfo; Artefactos:Cascabeles
Tabla A.2.6.-Zona norte; Artefactos:Cascabeles
Tabla A.2.7.-Zona Maya; Artefactos:Anillos
Tabla A.2.8.-Zona Centro; Artefactos: Anillos
Tabla A.2.9.-Zona Occidente; Artefactos: Anillos
Tabla A.2.10.-Zona Centro; Artefactos:Hachas
Tabla A.2.11.-Zona Occidente; Artefactos: Agujas.
Tabla A.2.12.-Zona Sur; Artefactos:Hachas
Tabla A.2.13.-Zona Occidente; Artefactos: Hachas
Tabla A.2.14 Porcentajes Finales de Piezas Arqueológicas de "Las Margaritas", por Número de Impacto.
Tabla A.2.15 Promedios de las piezas Arqueológicas de "Las Margaritas"
Tabla A.2.16 Concentraciones Porcentuales Promedio de las Piezas de "Las Margaritas"
Tabla A.2.17 Porcentajes de composición por (valores normalizados)-Regiones; OCCIDENTE
Tabla A.2.18 Porcentajes de composición por (valores normalizados)-Regiones; ZONA MAYA.
Tabla A.2.19 Porcentajes de composición por (valores normalizados)-Regiones; ZONA CENTRO
Tabla A.2.20 Porcentajes de composición por (valores normalizados)-Regiones; ZONA NORTE
Tabla A.2.21 Porcentajes de composición por (valores normalizados)-Regiones; "LAS MARGARITAS"

Tabla A.2.1.-Zona Maya: Artefactos:Cascabeles												
Pt.,Ni,Zn = No Ensayados												
* = 0.0001	C.S. Yuc. = Cenote Sagrado, Yuc.	A.M.N.H. = American Museum Of Natural History.										
Clave	Localidad	Colección	Referencia	% Fe	% Ag	% As	% Au	% Bi	% Sb	% Sn	% Pb	
30.0.1683	Huy.Yuc.	A.M.N.H.	(16)	---	0.10	0.00	---	---	---	2.00	0.01	
D3-C/8015	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.25	0.16	0.36	*	0.10	---	0.14	0.24	4.22
D3-C/4876	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.01	1.00	0.01	*	0.10	---	---	0.01	0.01
D3-C/1876	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	---	0.10	0.10	0.00	---	---	---	0.01	0.01
D4-C/5999	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.01	0.01	0.20	---	0.01	---	0.10	0.10	0.10
D4-C/4577	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.10	0.01	0.10	---	*	---	0.05	0.10	0.01
D4-C/6908	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.01	0.01	0.20	---	0.01	---	0.05	0.10	0.01
D-C/4848	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.10	0.10	0.40	---	0.01	---	0.05	0.10	>4
D-C/4947	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.01	0.10	0.01	0.10	0.05	---	0.05	>2	0.10
D-C/4342	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	---	0.10	0.10	---	---	---	0.01	1.00	0.10
D-C/4947	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	---	0.10	0.10	---	---	---	0.50	---	0.10
D1-C/4947	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	---	2.72	0.10	---	0.17	---	0.05	0.16	0.05
D2-C/4847	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.10	1.00	0.01	0.01	0.01	0.05	---	0.01	0.10
E-C/4842	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	---	0.10	0.10	---	0.01	---	---	2.00	0.10
E-C/1245	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	---	0.10	0.10	---	---	---	0.01	0.20	0.10
F-C/5987	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	---	0.23	0.16	---	0.01	---	0.14	0.12	-
F-C/4856	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.10	2.00	0.10	---	---	---	0.05	0.10	>4.0
F-C/6022	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	---	2.00	0.10	---	---	---	---	---	>4.0
F-C/6022	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.10	0.10	0.10	---	---	---	---	---	>4.0
F-C/6022	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	---	0.10	0.10	---	---	---	---	---	>4.0
F-C/6022	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.01	0.10	0.20	*	0.01	---	0.05	0.10	0.50
F-C/4854	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.01	0.10	0.20	*	0.01	---	0.01	0.10	0.50
F-C/6022	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	---	0.20	0.40	---	---	---	0.20	0.10	0.50
F-C/4958	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.10	2.00	0.10	---	---	---	0.05	0.40	0.50
F-C/4854	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.10	2.00	0.40	---	---	---	0.05	0.40	0.50
F-C/4852	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.01	0.10	0.20	---	0.01	---	0.05	0.10	0.01
F-C/4856	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.07	0.10	0.05	---	---	---	0.05	---	0.01
F-C/6017	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.00	0.10	0.10	---	0.01	---	---	0.10	---
F-C/4967	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.10	2.00	0.00	---	---	---	0.05	---	---
F-C/4854	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.10	2.00	0.10	---	---	---	0.00	>2.0	0.01
A-C/4872	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.20	>2.0	0.40	0.10	0.01	---	0.10	1.00	>4.0
A-C/4872	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.10	2.00	---	---	0.01	---	---	0.20	0.01
A-C/4872	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.10	1.00	*	0.10	0.01	---	---	0.10	0.01
A-C/4872	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.10	0.10	0.10	---	0.01	---	0.01	*	0.04
C/4872	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	---	0.01	---	---	---	---	---	0.10	0.01
C/4872	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	---	0.01	---	---	---	---	0.05	0.10	---
A-C/4872	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	---	0.10	---	---	---	---	---	---	*
C/4866	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.01	0.10	0.10	---	*	---	0.05	0.20	0.01

Pt.,Ni,Zn = No Ensayados											
Tabla A.2.1(Continuación.)-Zona Maya: Artefactos:Cascabeles											
* = 0.0001	C.S. Yuc. = Cenote Sagrado, Yuc.	A.M.N.H. = American Museum Of Natural History.									
Clave	Localidad	Colección	Referencia	% Fe	% Ag	% As	% Au	% Bi	% Sb	% Sn	% Pb
C/4867	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	0.01	0.01	0.10	---	---	0.05	0.10	0.01
C/4867	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	---	0.01	0.01	---	---	0.01	0.01	---
C/4867	C.S. Yuc.	Peabody M	(16)	---	C.01	0.01	---	---	0.01	0.10	---
A1.1	C.S. Yuc.	Peabody M	(30)	0.1	2	1	0	0.1	0.1	0.41	2
A1.2	C.S. Yuc.	Peabody M	(30)	0.01	2	1	0	0.05	0.1	0.2	2
A1.4	C.S. Yuc.	Peabody M	(30)	0.01	2	1	0	0.1	0.1	0.2	2
A1.5	C.S. Yuc.	Peabody M	(30)	0.1	1	1	1	0.05	0.05	1	2
A1.6	C.S. Yuc.	Peabody M	(30)	0.1	1	0.4	0.01	0.01	0.01	0.1	2
A1.7	C.S. Yuc.	Peabody M	(30)	0.01	0.1	0.2	*	0.01	0.05	0.1	0.5
A1.8	C.S. Yuc.	Peabody M	(30)	*	0.1	0.4	0	0.01	0.05	0.5	0.5
A1.9	C.S. Yuc.	Peabody M	(30)	0	0.1	0.1	0.01	0	0	0.1	0.01
C.ESPE.	C.S. Yuc.	M.N.A.H.	(30)	%Fe	%Ag	%As	%Ni	%Bi	%Sb	%Sn	%Pb
S/N	C.S. Yuc.	M.N.A.H.	(30)	0.02	0.80	?	-	-	-	0.05	0.05
CSI-1195	C.S. Yuc.	M.N.A.H.	(30)	0.85	0.06	?	0.12	0.013	0.5	0.098	0.098
CSI-2300	C.S. Yuc.	M.N.A.H.	(30)	0.2	0.078	?	0.02	0	0	0.03	0.03
CSI-497	C.S. Yuc.	M.N.A.H.	(30)	0.23	0.026	?	0.04	0.17	0.22	0.046	0.046
CSI-2702	C.S. Yuc.	M.N.A.H.	(30)	0.39	0.058	?	0.1	0.013	0.3	0.34	0.34
CSI-2702	C.S. Yuc.	M.N.A.H.	(30)	0.18	0.194	?	0.16	0.3	0.22	0.062	0.062

Tabla A.2.2.-Zona Centro; Artefactos:Cascabeles											
Pt,Ni,Zn = No Ensayados				U.S.N.M.:United States National Museum.							
= 0.0001		C.S. Yuc. = Cenote Sagrado, Yuc.		A.M.N.H. =American Museum Of Natural History.							
Clave	Localidad	Colección	Referencia	% Fe	% Ag	% As	% Au	%Bi	% Sb	% Sn	% Pb
24756	Asca. V.M.	U.S.N.M.	[16]	---	---	---	---	---	---	---	---
24782	Asca. V.M.	U.S.N.M.	[16]	---	---	---	---	---	---	---	19.2
30,223	Calix.V.M.	A.M.N.H.	[16]	0.1	0.1	0.1	---	---	---	---	0.01
30,9555	D.F. V.M.	A.M.N.H.	[16]	---	0.1	0.4	---	0.05	0.03	0.2	0.5
95036	D.F. V.M.	U.S.N.M.	[16]	---	0.001	---	---	---	---	---	---
24753	V. De M.	U.S.N.M.	[16]	---	---	---	---	---	---	---	7
24752	V. De M.	U.S.N.M.	[16]	0.1	---	---	---	---	---	---	4.7
C/10096d	V. De M.	Peabody M	[16]	---	0.1	0.001	---	---	0.001	---	---
C/10096a	V. De M.	Peabody M	[16]	---	0.01	0.4	0.001	0.02	0.05	0.1	4
C/10096b	V. De M.	Peabody M	[16]	---	0.1	0.4	0.001	0.01	0.05	0.1	4
C/10096c	V. De M.	Peabody M	[16]	---	0.1	0.4	---	0.01	0.05	0.1	4
S/N	V. De M.	S.R.	[16]	---	---	---	---	---	---	---	13.2
S/N	V. De M.	M.N.Mex.	[16]	---	0.1	*	0.01	---	0.01	---	---
S/N	Teo. V. M.	M.N.Mex.	[16]	---	0.1	1	0	0.01	0.01	---	---
S/N	Teo. V. M.	M.N.Mex.	[16]	---	0.1	*	0.01	0.01	0.01	---	0.01
S/N	Tena V.M.	M.N.Mex.	[16]	---	---	---	0.01	0.01	---	---	0.01
T66-5	D.F. V.M.	U.N.A.M.	[16]	---	0.01	---	---	---	---	---	2
S/N	Chol. Pue.	M.N.Mex.	[16]	---	0.1	---	---	0.01	0.01	---	---
97782	Tlax. Tlax.	U.S.N.M.	[16]	---	---	---	---	---	---	---	---

Tabla A.2.3.-Zona Occidente; Artefactos:Cascabeles											
MRG=MUSEO REGIONAL DE GUADALAJARA. na = no analizado.											
M, J, C, y N = Michoacán, Jalisco, Colima y Nayarit.											
Clave	Localidad	Colección	Referencia	% Fe	% Ag	% As	% Au	%Bi	% Sb	% Sn	% Pb
S/N	Mich.	G.P.	[16]	---	0.10	0.10	---	---	---	---	---
S/N	Mich.	G.P.	[16]	---	0.10	0.10	---	---	---	---	---
30,202B	Zaca. Mich.	A.M.N.H.	[16]	---	0.10	---	---	---	---	0.10	---
30,202B	Zaca. Mich.	A.M.N.H.	[16]	---	0.10	---	---	---	---	0.10	0.00
128a	M,J,C y N	MRG	[31]	na	0.03	0.45	na	na	0.02	6.93	0.01
128b	M,J,C y N	MRG	[31]	0.03	0.03	0.44	---	na	0.02	7.37	na
195[6]	M,J,C y N	MRG	[31]	0.05	0.11	0.02	0.00	na	0.02	3.56	na
195[8]	M,J,C y N	MRG	[31]	0.04	0.11	0.01	0.00	na	0.02	3.28	na
199	M,J,C y N	MRG	[31]	0.03	0.02	0.07	0.00	na	0.03	12.18	na
891	M,J,C y N	MRG	[31]	0.02	0.13	0.02	0.00	na	0.03	11.08	0.03
893n	M,J,C y N	MRG	[31]	0.07	0.07	0.10	0.00	na	0.06	15.77	na
893	M,J,C y N	MRG	[31]	na	0.05	0.17	na	na	0.03	12.30	na
895n	M,J,C y N	MRG	[31]	0.07	0.06	0.27	0.00	na	0.05	13.12	na
897n	M,J,C y N	MRG	[31]	---	0.15	---	0.00	na	0.33	6.45	na
910n	M,J,C y N	MRG	[31]	---	0.14	0.01	0.00	na	0.04	11.35	na
1220n	M,J,C y N	MRG	[31]	0.11	0.02	0.01	0.00	na	0.01	3.23	na
1440n	M,J,C y N	MRG	[31]	0.20	0.10	0.16	0.00	na	0.02	4.14	na
1479n	M,J,C y N	MRG	[31]	0.02	0.02	0.12	0.00	na	0.01	2.34	na
484n	M,J,C y N	MRG	[31]	0.02	0.10	0.13	0.00	na	0.03	3.64	na
487n	M,J,C y N	MRG	[31]	0.03	0.02	0.16	0.00	na	0.01	1.62	na
493n	M,J,C y N	MRG	[31]	0.03	0.14	0.01	0.00	na	0.03	2.12	na
1499n	M,J,C y N	MRG	[31]	0.04	0.02	0.22	0.00	na	0.03	7.73	na
1631n	M,J,C y N	MRG	[31]	0.04	0.09	0.01	0.00	na	0.02	5.38	na
1860n	M,J,C y N	MRG	[31]	0.03	0.02	0.13	0.00	na	0.03	8.54	na
2387n	M,J,C y N	MRG	[31]	0.06	0.06	0.09	0.00	na	0.05	19.10	na
2388n	M,J,C y N	MRG	[31]	0.05	0.06	0.13	0.00	na	0.06	19.98	na
2492n	M,J,C y N	MRG	[31]	0.03	0.04	0.18	0.00	na	0.04	8.37	na
2495n	M,J,C y N	MRG	[31]	0.03	0.04	0.04	0.00	na	0.01	4.58	na
2539n	M,J,C y N	MRG	[31]	0.11	0.20	0.03	0.00	na	0.03	7.01	na
2650n	M,J,C y N	MRG	[31]	0.05	0.51	0.36	0.00	na	0.09	8.47	na

Tabla A.2.4.-Zona Sur; Artefactos:Cascabeles											
Clave	Localidad	Colección	Referencia	% Fe	% Ag	% As	% Au	%Bi	% Sb	% Sn	% Pb
C/3777	Tlaco. Oax.	Peabody M	[16]	0.01	0.01	0.1	---	0.01	0.2	0.4	*

Tabla A.2.5.-Zona Del Golfo: Artefactos:Cascabeles											
Clave	Localidad	Colección	Referencia	% Fe	% Ag	% As	% Au	%Bi	% Sb	% Sn	% Pb
97782	Oriza. Ver.	U.S.N.M.	[16]	---	0.001	---	---	---	---	---	0.01
30.2.4518	Jopoy Ver.	A.M.N.H.	[16]	---	2	0.1	---	0.1	---	0.4	---
N.53	Meda. Ver.	A.M.N.H.	[16]	---	0.1	---	---	---	---	---	0.5
30.2.6816	L.Flo. Tam.	A.M.N.H.	[16]	---	0.1	---	---	---	---	---	---

Tabla A.2.6.-Zona norte: Artefactos:Cascabeles											
E. C. M. =Edge of Cedars Museum; M. N. AZ =Museum of Northern AZ C. G. Chihuahua, G. P. =Pueblo Gila;P. B. Ch. = Pueblo Bonito Chaco; A. S. M. = Arizona State Museum S. M. =Smithsonian Museum; M. M. = Maxwell Museum; A. S. = Archaeological Society											
Clave	Localidad	Colección	Referencia	% Fe	% Ag	% As	% Au	%Bi	% Sb	% Sn	% Pb
4479-40	C.G. Chih.	G.P.	[16]	---	2.00	---	---	---	---	---	---
1200	C.G. Chih.	M.N.H.	[16]	---	2.00	---	---	---	---	---	---
4479-36	C.G. Chih.	G.P.	[16]	---	0.10	0.00	---	---	0.05	---	---
4479-39	C.G. Chih.	G.P.	[16]	---	0.10	---	---	---	0.05	---	---
4479-35	C.G. Chih.	G.P.	[16]	---	0.10	---	---	---	---	---	---
1200	C.G. Chih.	M.N.H.	[16]	---	0.00	---	---	---	---	---	---
1) CG6886	Paquime	Paquime	[8]	na	0.29	0.37	na	na	0.99	0.00	0.01
2) CG6576	Paquime	Paquime	[8]	na	0.31	0.11	na	na	0.22	0.00	0.01
3) CG8341	Paquime	Paquime	[8]	na	0.13	0.08	na	na	0.11	0.00	0.25
4)CG8126A	Paquime	Paquime	[8]	na	0.03	0.01	na	na	0.01	0.02	0.00
5) CG7076	Paquime	Paquime	[8]	na	0.03	0.01	na	na	0.01	0.00	0.00
6) CG8270	Paquime	Paquime	[8]	na	0.09	0.01	na	na	0.00	0.01	0.00
7)CG1820C	Paquime	Paquime	[8]	na	0.12	0.02	na	na	0.01	0.04	0.00
8) CG2075	Paquime	Paquime	[8]	na	0.11	0.02	na	na	0.03	0.01	0.00
9) CG7840	Paquime	Paquime	[8]	na	0.11	0.03	na	na	0.02	0.01	0.01
10)CG8384	Paquime	Paquime	[8]	na	0.12	0.01	na	na	0.01	0.00	0.01
11)spilled	Paquime	Paquime	[8]	na	0.00	0.00	na	na	0.00	0.18	0.05
12)Copper	UTAZ	Paquime	[8]	na	0.12	0.03	na	na	0.04	0.00	0.01
13)M. bell	Big Bell	A. S. M.	[8]	na	0.11	0.01	na	na	0.01	0.01	0.05
14)Small B.	Gatlin	A. S. M.	[8]	na	0.07	0.13	na	na	0.01	0.09	0.01
15)Fragment	Pottery M.	M. M.	[8]	na	0.03	0.17	na	na	0.01	0.01	0.01
16)Bell F.	E. C. M.	E. C. M.	[8]	na	0.01	0.02	na	na	0.01	0.01	0.02
17)B Frag.	C.B. Ruin	M. N.AZ	[8]	na	0.08	0.03	na	na	0.02	0.01	0.02
18)Tncker B.	Pollack S.	M. N.AZ	[8]	na	0.01	0.01	na	na	0.01	0.01	0.02
19)Bell-1	SundownS	A. S.	[8]	na	0.01	0.02	na	na	0.02	0.01	0.03
20)Bell-2	SundownS	A.S.	[8]	na	0.00	0.02	na	na	0.00	0.00	0.02

Tabla A.2.7.-Zona Maya: Artefactos:Anillos											
Pb,Ni,Zn = No Ensayados * = 0.0001 C.S. Yuc. = Cenote Sagrado, Yuc. A.M.N.H. =American Museum of Natural History.											
Clave	Localidad	Colección	Referencia	% Fe	% Ag	% As	% Au	%Bi	% Sb	% Sn	% Pb
C/6031	C.S. Yuc.	Peabody M	[16]	0.1	0.1	0.4	---	0.005	0.01	0.2	0.5
C/6028	C.S. Yuc.	Peabody M	[16]	0.01	0.1	0.4	---	0.005	---	---	0.5
C/4839	C.S. Yuc.	Peabody M	[16]	0.001	0.1	0.01	0.1	---	---	---	0.01
C/4831	C.S. Yuc.	Peabody M	[16]	---	0.01	0.01	---	---	---	0.1	0.001
C/5034	C.S. Yuc.	Peabody M	[16]	---	0.01	0.01	---	---	---	0.1	0.01
S/N	C.S. Yuc.	Peabody M	[16]	0.1	0.1	0.001	8.8	---	---	---	0.01

Tabla A.2.8.-Zona Centro: Artefactos: Anillos											
Clave	Localidad	Colección	Referencia	% Fe	% Ag	%As	% Au	%Bi	% Sb	% Sn	% Pb
30.0.16	Calix.V.M.	A.M.N.H.	[16]	---	2	---	---	---	---	---	---
30.0.15	Calix.V.M.	A.M.N.H.	[16]	---	0.1	0.01	0.1	---	---	2	---

Tabla A.2.9.-Zona Occidente; Artefactos: Anillos
MRG=MUSEO REGIONAL DE GUADALAJARA. na = no analizado.
M, J, C, y N = Michoacán, Jalisco, Colima y Nayarit.

Clave	Localidad	Colección	Referencia	% Fe	% Ag	% As	% Au	% Bi	% Sb	% Sn	% Pb
36d	M.J.C y N	MRG	[31]	0.00	0.03	0.04	0.00	na	0.06	9.57	na
39bn	M.J.C y N	MRG	[31]	0.00	0.14	0.11	0.00	na	0.04	12.44	na
41an	M.J.C y N	MRG	[31]	0.00	0.01	0.03	0.00	na	0.04	10.41	na
598n	M.J.C y N	MRG	[31]	0.00	0.01	0.12	0.00	na	0.03	11.08	na
635n	M.J.C y N	MRG	[31]	0.04	0.02	0.12	0.00	na	0.04	12.44	na
682an	M.J.C y N	MRG	[31]	0.00	0.19	0.08	0.00	na	0.05	14.75	na
1665n	M.J.C y N	MRG	[31]	0.03	0.12	0.05	0.00	na	0.04	12.44	na
1718n	M.J.C y N	MRG	[31]	0.00	0.06	0.11	0.00	na	0.05	12.78	na
1737n	M.J.C y N	MRG	[31]	0.00	0.05	0.04	0.00	na	0.05	16.86	na
1744n	M.J.C y N	MRG	[31]	0.00	0.03	0.05	0.00	na	0.03	10.58	na
1748n	M.J.C y N	MRG	[31]	0.02	0.03	0.05	0.00	na	0.04	13.64	na

Tabla A.2.10.-Zona Centro; Artefactos:Hachas

Clave	Localidad	Colección	Referencia	% Fe	% Ag	% As	% Au	% Bi	% Sb	% Sn	% Pb
D38-1	D.F. V.M.	U.N.M.	[16]	---	---	---	---	---	---	0.01	---

Tabla A.2.11.-Zona Occidente; Artefactos:Agujas
MRG=MUSEO REGIONAL DE GUADALAJARA. na = no analizado.
M, J, C, y N = Michoacán, Jalisco, Colima y Nayarit.

COBRE

Clave	Localidad	Colección	Referencia	% Fe	% Ag	% As	% Au	% Bi	% Sb	% Sn	% Pb
80	M.J.C y N	MRG	[31]	na	0.04	na	na	0.00	0.00	0.00	0.00
83	M.J.C y N	MRG	[31]	na	0.01	0.16	na	0.00	0.01	0.00	na
806	M.J.C y N	MRG	[31]	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
2459	M.J.C y N	MRG	[31]	0.02	0.11	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
2689	M.J.C y N	MRG	[31]	0.00	0.10	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Fx15	M.J.C y N	MRG	[31]	na	0.04	na	0.26	na	0.01	0.00	0.01

BRONCES

Clave	Localidad	Colección	Referencia	% Fe	% Ag	% As	% Au	% Bi	% Sb	% Sn	% Pb
74	M.J.C y N	MRG	[31]	na	0.04	1.61	na	0.00	0.01	0.00	0.00
98	M.J.C y N	MRG	[31]	na	0.03	2.30	na	0.00	0.00	0.03	0.00
804a1	M.J.C y N	MRG	[31]	na	0.03	2.17	na	0.00	0.01	0.00	0.00
804a2	M.J.C y N	MRG	[31]	na	0.03	2.12	na	0.00	0.02	0.02	na
2352	M.J.C y N	MRG	[31]	na	0.04	0.26	na	na	n	11.81	0.00
2352n	M.J.C y N	MRG	[31]	na	0.04	0.18	0.00	na	0.03	13.12	na

Tabla A.2.12.-Zona Sur; Artefactos:Hachas

Clave	Localidad	Colección	Referencia	% Fe	% Ag	% As	% Au	% Bi	% Sb	% Sn	% Pb
C/26206	Tlaco. Oax.	Peabody M	[16]	*	0.01	0.10	---	0.01	0.20	0.40	*
C/26206	Tlaco. Oax.	Peabody M	[16]	0.00	1.00	0.01	---	---	0.05	---	0.02
C/26023	Tlaco. Oax.	Peabody M	[16]	0.10	0.01	0.10	---	---	0.01	*	0.01
C/10094d	Oax.	Peabody M	[16]	---	0.10	0.10	---	0.00	0.05	---	---
C/10094b	Oax.	Peabody M	[16]	---	0.10	0.10	---	---	---	---	0.00
C/10094b	Oax.	Peabody M	[16]	---	0.00	---	---	---	---	0.20	---
C/10094c	Oax.	Peabody M	[16]	---	0.10	---	---	---	0.05	---	---
C/10094c	Oax.	Peabody M	[16]	---	0.10	0.00	---	---	---	---	---
C/10094a	Oax.	Peabody M	[16]	---	0.10	0.10	---	---	---	---	---
C/10094a	Oax.	Peabody M	[16]	---	0.00	---	---	---	---	---	---
C/10094d	Oax.	Peabody M	[16]	---	0.10	---	---	---	---	---	---
C/10094e	Oax.	Peabody M	[16]	---	0.10	---	---	---	---	---	---

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Tabla A.2.13.-Zona Occidente; Artefactos: Hachas											
MRG=MUSEO REGIONAL DE GUADALAJARA.											
M. J. C. y N = Michoacán, Jalisco, Colima y Nayarit. na = no analizado.											
Clave	Localidad	Colección	Referencia	% Fe	% Ag	% As	% Au	% Bi	% Sb	% Sn	% Pb
28	M.J.C y N	MRG	(31)	na	0.06	1.22	na	0.05	0.01	0.01	0.00
351	M.J.C y N	MRG	(31)	na	0.07	0.71	na	0.00	0.04	1.33	0.10
351n	M.J.C y N	MRG	(31)	0	0.02	0.71	0.00	na	0.08	1.15	na
367n	M.J.C y N	MRG	(31)	0.01	0.10	0.01	0.00	na	0.01	2.56	na
369	M.J.C y N	MRG	(31)	na	0.11	0.64	na	na	0.18	5.31	na
374	M.J.C y N	MRG	(31)	na	0.04	0.08	na	na	na	7.92	na
374n	M.J.C y N	MRG	(31)	0	0.04	0.11	0.00	na	0.08	8.72	na
386	M.J.C y N	MRG	(31)	na	0.27	1.31	na	0.00	0.10	3.10	0.11
402n	M.J.C y N	MRG	(31)	0.015	0.10	0.12	0.00	na	0.00	1.26	na
403b	M.J.C y N	MRG	(31)	na	0.12	0.07	na	0.00	0.03	8.06	0.00
2249	M.J.C y N	MRG	(31)	na	0.60	0.32	na	na	na	1.94	0.01

107

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla A.2.14 Porcentajes finales de piezas arqueológicas de "Las Margaritas", por número de impacto									
Muestra	Espectro	%Fe	%Ni	%Cu	%As	%Ag	%Sn	%Sb	%Pb
(1) Cascabe	9	0.04	0.03	97.49	0.91	0.08	0.76	0.18	0.51
	10	0.07	0.06	97.13	0.90	0.10	0.90	0.29	0.55
	11	0.04	0.04	98.05	0.68	0.10	0.69	0.09	0.31
(2) Cascabe	27	0.24	0.22	97.97	0.59	0.06	0.78	0.14	0.00
(3) Cascabe	28	0.06	0.05	98.36	0.76	0.06	0.17	0.07	0.46
	29	0.17	0.16	97.20	1.23	0.10	0.26	0.13	0.74
(4) Cascabe	57	0.18	0.16	99.18	0.37	0.04	0.05	0.03	0.00
	58	0.17	0.15	99.21	0.39	0.02	0.03	0.03	0.00
(5) Medio ca	26	0.43	0.36	96.05	1.32	0.16	1.43	0.25	0.00
(6) Fragment	53	0.18	0.16	98.19	0.65	0.08	0.63	0.11	0.00
	54	0.10	0.18	97.86	0.78	0.10	0.74	0.14	0.00
(7) Fragment	55	0.03	0.02	82.81	2.60	0.17	0.03	0.12	14.23
	56	0.04	0.03	87.13	1.32	0.17	0.00	0.16	11.15
(8) Anillo sud	68	0.10	0.09	93.21	0.07	0.01	6.47	0.01	0.04
(9) Cíncel 1	17	0.02	0.02	98.38	0.17	0.08	1.30	0.04	0.00
	18	0.02	0.02	98.33	0.17	0.07	1.23	0.08	0.08
	19	0.02	0.02	98.24	0.21	0.09	1.30	0.09	0.04
(10) Cíncel 2	20	0.02	0.01	99.25	0.05	0.03	0.55	0.01	0.06
	21	0.03	0.02	99.04	0.06	0.03	0.74	0.03	0.06
	22	0.02	0.02	99.17	0.07	0.05	0.67	0.00	0.00
(11) Cíncel 3	23	0.01	0.01	95.36	0.34	0.06	4.12	0.10	0.00
	24	0.02	0.01	94.90	0.43	0.08	4.46	0.10	0.00
	25	0.02	0.01	94.99	0.39	0.07	4.40	0.11	0.00
(12) Cíncel 4	37	0.02	0.02	96.19	0.42	0.05	3.18	0.11	0.00
	38	0.03	0.03	97.11	0.33	0.06	2.35	0.08	0.00
(13) Hacha	12	0.03	0.02	98.69	1.09	0.04	0.00	0.12	0.00
	13	0.03	0.03	98.59	1.21	0.03	0.00	0.11	0.00
	14	0.03	0.03	98.55	1.20	0.03	0.00	0.16	0.00
	15	0.35	0.30	98.24	1.06	0.03	0.00	0.01	0.00
	16	0.00	0.00	99.17	0.77	0.02	0.00	0.03	0.00
(14) Aguja 1	39	0.03	0.02	97.15	0.15	0.07	2.48	0.09	0.00
	40	0.09	0.08	95.68	0.26	0.11	3.70	0.08	0.00
(15) Aguja 2	41	0.02	0.02	95.83	0.42	0.11	3.28	0.26	0.06
	42	0.04	0.03	94.37	0.49	0.14	4.50	0.34	0.09
(16) Aguja 3	43	0.03	0.03	96.84	0.59	0.06	2.33	0.11	0.00
	44	0.04	0.03	96.52	0.72	0.07	2.54	0.08	0.00
(17) Aguja 4	45	0.02	0.02	99.45	0.11	0.07	0.29	0.04	0.00
	46	0.03	0.02	99.36	0.13	0.07	0.33	0.05	0.00
(18) Aguja 5	47	0.03	0.03	97.38	0.20	0.10	2.18	0.09	0.00
	48	0.04	0.04	97.45	0.37	0.11	1.91	0.09	0.00
	49	0.05	0.04	97.57	0.27	0.11	1.90	0.07	0.00
(19) Aguja 6	50	0.03	0.03	99.59	0.31	0.03	0.00	0.02	0.00
	51	0.03	0.03	99.61	0.25	0.04	0.00	0.05	0.00
(20) Anillo 1	30	0.05	0.04	87.26	0.51	0.12	11.88	0.15	0.00
	31	0.07	0.06	85.03	0.62	0.12	13.92	0.18	0.00
(21) Anillo 2	32	0.80	0.69	81.80	0.38	0.08	16.03	0.10	0.12
	33	1.26	1.14	82.48	0.50	0.08	14.23	0.14	0.17
(22) Resto d	34	0.06	0.05	99.83	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00
	35	0.12	0.10	99.76	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
(23) Resto d	36	0.03	0.02	99.45	0.06	0.07	0.11	0.15	0.11
(24) Lámina	52	0.02	0.02	97.22	0.52	0.14	1.80	0.28	0.00
(25) Lámina	62	0.03	0.03	98.28	0.21	0.12	1.28	0.06	0.00
(26) Lámina	63	0.02	0.02	98.85	0.16	0.05	0.58	0.06	0.26
(27) Lámina	64	0.01	0.01	97.83	0.51	0.06	1.48	0.09	0.00
(28) Lámina	67	0.02	0.02	99.47	0.47	0.01	0.00	0.02	0.00
(29) Fragme	59	0.01	0.01	99.93	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
(30) Fragme	60	0.06	0.03	98.26	0.91	0.02	0.00	0.53	0.18
	61	0.04	0.03	98.94	0.76	0.01	0.00	0.33	0.18
(31) Fragme	65	0.02	0.02	96.49	0.34	0.09	2.96	0.08	0.00
	66	0.02	0.01	96.42	0.34	0.08	3.05	0.09	0.00

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla A.2.15 Promedios de las piezas arqueológicas de "Las Margaritas".

Muestra	Espectro	%Fe	%Ni	%Cu	%As	%Ag	%Sn	%Sb	%Pb	
		9	0.04	0.03	97.49	0.91	0.08	0.76	0.18	0.51
(1) Cascabel		10	0.07	0.06	97.13	0.90	0.10	0.90	0.29	0.55
		11	0.04	0.04	98.05	0.68	0.10	0.69	0.09	0.31
	prom		0.05	0.04	97.55	0.83	0.09	0.79	0.19	0.48
(2) Cascabel		27	0.24	0.22	97.97	0.59	0.06	0.78	0.14	0.60
(3) Cascabel		28	0.05	0.05	98.36	0.76	0.06	0.17	0.07	0.48
		29	0.17	0.16	97.20	1.23	0.10	0.26	0.13	0.74
	prom		0.16	0.14	97.84	0.86	0.07	0.40	0.12	0.40
(4) Cascabel		57	0.18	0.16	99.18	0.37	0.04	0.05	0.03	0.00
		58	0.17	0.15	99.21	0.39	0.02	0.03	0.03	0.00
	prom		0.17	0.15	99.19	0.38	0.03	0.04	0.03	0.00
(5) Medio cas		26	0.43	0.38	96.05	1.32	0.16	1.43	0.25	0.60
(6) Fragment		53	0.18	0.18	98.19	0.65	0.03	0.63	0.03	0.00
		54	0.20	0.18	97.86	0.76	0.10	0.74	0.14	0.00
	prom		0.19	0.17	98.02	0.71	0.09	0.68	0.13	0.00
(7) Fragment		55	0.03	0.02	82.81	2.60	0.17	0.03	0.12	14.23
		56	0.04	0.03	87.13	1.32	0.17	0.00	0.16	11.15
	prom		0.03	0.03	84.97	1.96	0.17	0.01	0.14	12.69
(8) Anillo susp		68	0.10	0.09	93.21	0.07	0.01	6.47	0.01	0.04
(9) Cincel 1		17	0.02	0.02	98.38	0.17	0.08	1.30	0.04	0.00
		18	0.02	0.02	98.33	0.17	0.07	1.23	0.08	0.08
		19	0.02	0.02	98.24	0.21	0.09	1.30	0.09	0.04
	prom		0.02	0.02	98.31	0.18	0.08	1.28	0.07	0.04
(10) Cincel 2		20	0.02	0.01	99.25	0.05	0.03	0.55	0.01	0.06
		21	0.03	0.02	99.04	0.06	0.03	0.74	0.03	0.06
		22	0.02	0.02	99.17	0.07	0.05	0.67	0.00	0.00
	prom		0.02	0.02	99.18	0.06	0.04	0.65	0.01	0.04
(11) Cincel 3		23	0.01	0.01	95.36	0.34	0.06	4.12	0.10	0.00
		24	0.02	0.01	94.90	0.43	0.08	4.46	0.10	0.00
		25	0.02	0.01	94.99	0.39	0.07	4.40	0.11	0.00
	prom		0.02	0.01	95.08	0.39	0.07	4.33	0.10	0.00
(12) Cincel 4		37	0.02	0.02	96.19	0.42	0.05	3.18	0.11	0.00
		38	0.03	0.03	97.11	0.33	0.06	2.35	0.08	0.00
	prom		0.03	0.02	96.65	0.38	0.06	2.76	0.10	0.00
(13) Hacha		12	0.03	0.02	98.69	1.69	0.04	0.03	0.00	0.00
		13	0.03	0.03	98.59	1.21	0.03	0.00	0.11	0.00
		14	0.03	0.03	98.55	1.20	0.03	0.00	0.16	0.00
		15	0.35	0.30	98.24	1.06	0.03	0.00	0.01	0.00
	prom		0.11	0.09	98.52	1.14	0.04	0.00	0.10	0.00
(14) Aguja 1		39	0.03	0.02	97.15	0.15	0.07	2.48	0.09	0.00
		40	0.09	0.08	95.68	0.26	0.11	3.70	0.08	0.00
	prom		0.06	0.05	96.42	0.21	0.09	3.09	0.06	0.00
(15) Aguja 2		41	0.02	0.02	95.83	0.42	0.11	3.28	0.28	0.06
		42	0.04	0.03	94.37	0.49	0.14	4.50	0.34	0.09
	prom		0.03	0.03	95.10	0.46	0.12	3.89	0.30	0.07
(16) Aguja 3		43	0.03	0.03	96.84	0.59	0.06	2.33	0.11	0.00
		44	0.04	0.03	96.52	0.72	0.07	2.54	0.08	0.00
	prom		0.04	0.03	96.68	0.66	0.07	2.43	0.10	0.00
(17) Aguja 4		45	0.02	0.02	99.45	0.11	0.07	0.29	0.04	0.00
		46	0.03	0.02	99.36	0.13	0.07	0.33	0.05	0.00
	prom		0.03	0.02	99.40	0.12	0.07	0.31	0.04	0.00
(18) Aguja 5		47	0.03	0.03	97.38	0.20	0.10	2.18	0.09	0.00
		48	0.04	0.04	97.45	0.37	0.11	1.91	0.09	0.00
		49	0.05	0.04	97.57	0.27	0.11	1.90	0.07	0.00
	prom		0.04	0.03	97.47	0.28	0.10	2.00	0.08	0.00
(19) Aguja 6		50	0.03	0.03	99.59	0.31	0.03	0.00	0.02	0.00
		51	0.03	0.03	99.61	0.25	0.04	0.00	0.05	0.00
	prom		0.03	0.03	99.60	0.28	0.04	0.00	0.03	0.00
(20) Anillo 1		30	0.05	0.04	87.26	0.51	0.12	11.88	0.15	0.00
		31	0.07	0.06	85.03	0.62	0.12	13.92	0.18	0.00
	prom		0.06	0.05	86.14	0.56	0.12	12.90	0.16	0.00
(21) Anillo 2		32	0.80	0.69	81.80	0.38	0.08	16.03	0.10	0.12
		33	1.26	1.14	82.48	0.50	0.08	14.23	0.14	0.17
	prom		1.03	0.91	82.14	0.44	0.08	15.13	0.12	0.14
(22) Resto de		34	0.06	0.05	99.83	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00
		35	0.10	0.02	99.76	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
	prom		0.09	0.08	99.80	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
(23) Resto de		36	0.03	0.02	99.45	0.06	0.07	0.11	0.15	0.11
(24) Lámina 1		52	0.02	0.02	97.22	0.52	0.14	1.80	0.28	0.00
(25) Lámina 2		62	0.03	0.03	98.28	0.21	0.12	1.28	0.06	0.00
(26) Lámina 3		63	0.02	0.02	98.85	0.16	0.05	0.58	0.06	0.26
(27) Lámina 4		64	0.01	0.01	97.83	0.51	0.06	1.48	0.09	0.00
(28) Lámina 5		67	0.02	0.02	99.47	0.47	0.01	0.00	0.02	0.00
(29) Fragment		59	0.01	0.01	99.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(30) Fragment		60	0.06	0.03	98.26	0.91	0.02	0.00	0.53	0.18
		61	0.04	0.03	98.94	0.76	0.01	0.00	0.03	0.18
	prom		0.05	0.03	98.60	0.84	0.02	0.00	0.28	0.18
(31) Fragment		65	0.02	0.02	96.49	0.34	0.09	2.96	0.08	0.00
		66	0.02	0.01	96.42	0.34	0.08	3.05	0.09	0.00
	prom		0.02	0.02	96.45	0.34	0.08	3.00	0.08	0.00

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Promedios									
Muestra	%Pb	%Fe	%Ni	%Cu	%Ag	%Sb	%Sn	%As	%As/%Sn
(1) Cascabel	0.46	0.05	0.04	97.55	0.09	0.19	0.79	0.83	1.01
(2) Cascabel	0.00	0.24	0.22	97.97	0.06	0.14	0.78	0.59	1.36
(3) Cascabel	0.40	0.16	0.14	97.84	0.07	0.12	0.40	0.86	1.26
(4) Cascabel	0.00	0.17	0.15	99.19	0.03	0.03	0.04	0.38	0.42
(5) Medio ca	0.00	0.43	0.39	96.05	0.16	0.25	1.43	1.32	2.75
(6) Fragmen	0.19	0.17	0.17	98.22	0.13	0.13	0.58	0.71	1.40
(7) Fragmen	12.69	0.03	0.03	84.97	0.17	0.14	0.01	1.96	1.98
(8) Anillo sus	0.04	0.10	0.09	93.21	0.01	0.01	6.47	0.07	6.54
(9) Cincel 1	0.04	0.02	0.02	98.31	0.08	0.07	1.28	0.18	1.46
(10) Cincel 2	0.04	0.02	0.02	99.16	0.04	0.01	0.65	0.06	0.72
(11) Cincel 3	0.00	0.02	0.01	95.08	0.07	0.10	4.33	0.39	4.71
(12) Cincel 4	0.00	0.03	0.02	96.65	0.06	0.10	2.76	0.38	3.14
(13) Hacha 1	0.00	0.09	0.08	98.65	0.03	0.09	0.00	1.07	1.07
(14) Aguja 1	0.00	0.06	0.05	96.42	0.09	0.09	3.09	0.21	3.20
(15) Aguja 2	0.07	0.03	0.03	95.10	0.12	0.30	3.89	0.46	4.35
(16) Aguja 3	0.00	0.04	0.03	96.68	0.07	0.10	2.43	0.66	3.09
(17) Aguja 4	0.00	0.03	0.02	99.40	0.07	0.04	0.31	0.12	0.43
(18) Aguja 5	0.00	0.04	0.03	97.47	0.10	0.08	2.00	0.28	2.27
(19) Aguja 6	0.00	0.03	0.03	99.60	0.04	0.03	0.00	0.28	0.28
(20) Anillo 1	0.00	0.06	0.05	86.14	0.12	0.16	12.90	0.56	13.46
(21) Anillo 2	0.14	1.03	0.91	82.14	0.08	0.12	15.13	0.44	15.57
(22) Resto d	0.00	0.09	0.08	99.80	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
(23) Resto d	0.11	0.03	0.02	99.45	0.07	0.15	0.11	0.06	0.16
(24) Lámina	0.00	0.02	0.02	97.22	0.14	0.28	1.80	0.52	2.32
(25) Lámina	0.00	0.03	0.03	98.28	0.12	0.06	1.28	0.21	1.48
(26) Lámina	0.26	0.02	0.02	98.85	0.05	0.06	0.58	0.16	0.74
(27) Lámina	0.00	0.01	0.01	97.83	0.06	0.09	1.48	0.51	1.99
(28) Lámina	0.00	0.02	0.02	99.47	0.01	0.02	0.00	0.47	0.47
(29) Fragme	0.00	0.01	0.01	99.93	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
(30) Fragme	0.18	0.05	0.03	98.60	0.02	0.28	0.00	0.84	0.84
(31) Fragme	0.00	0.02	0.02	96.45	0.08	0.08	3.00	0.34	3.34
	%Pb	%Fe	%Ni	%Cu	%Ag	%Sb	%Sn	%As	%As/%Sn

OCCIDENTE							
CASCABELES	%Sn	%As	%Sb	Sn(ug/g)	Sn	As	Sb
128a	6.93	0.45	0.02	6930	94	6	0
128b	7.37	0.44	0.02	7370	94	6	0
195[6]	3.56	0.02	0.02	3560	99	0	1
195[8]	3.28	0.01	0.02	3280	99	0	0
199	12.18	0.07	0.03	1218	92	5	2
891	1.08	0.02	0.01	1080	96	1	3
893n	15.77	0.10	0.06	1577	96	1	4
893	12.30	0.17	0.03	1230	86	12	2
895n	13.12	0.27	0.05	1312	80	17	3
897n	6.45	--	0.33	6450	95	0	5
910n	11.35	0.01	0.04	1135	96	1	3
1220n	3.23	0.01	0.01	3230	99	0	0
1460n	4.14	0.16	0.02	4140	96	4	0
1479n	2.34	0.12	0.01	2340	95	5	0
484n	3.64	0.13	0.03	3640	96	3	1
487n	1.62	0.16	0.01	1620	91	9	0
493n	2.12	0.01	0.03	2120	98	0	1
1499n	7.73	0.22	0.03	7730	97	3	0
1631n	5.39	0.01	0.02	5380	99	0	0
1860n	8.54	0.13	0.03	8540	98	2	0
2387n	18.0	0.02	0.05	1810	96	1	3
2388n	19.98	0.13	0.06	1998	91	6	3
2492n	8.37	0.18	0.04	8370	97	2	0
2495n	4.58	0.04	0.01	4580	99	1	0
2539n	7.01	0.03	0.03	7010	99	0	0
2650n	8.47	0.36	0.09	8470	95	4	1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla A.2.18 Porcentajes de composición por (valores normalizados)-Regiones.

ZONA MAYA

CASCABELES	%Sn	%As	%Sb	Sn(ug/g)	Sn	As	Sb
30.0.1683	2.00	0.00	0.00	2000	100	0	0
D3-C/6015	0.34	0.36	0.14	240	32	49	19
D3-C/4876	0.01	0.01	0.00	10	50	50	0
D3-C/1876	0.01	0.10	0.00	10	9	91	0
D4-C/5999	0.10	0.20	0.10	100	25	50	25
D4-C/4577	0.10	0.10	0.05	100	40	40	20
D4-C/6908	0.10	0.20	0.05	100	29	57	14
D-C/4948	0.10	0.10	0.05	100	18	73	9
D-C/4947	2.00	0.01	0.05	2000	97	0	2
D-C/4542	1.00	0.10	0.01	1000	90	9	1
D-C/4947	0.00	0.10	0.50	0	0	17	83
D1-C/4947	0.16	0.10	0.05	160	52	32	16
D2-C/4847	0.01	0.01	0.05	10	14	14	71
E-C/4842	2.00	0.10	0.00	2000	95	5	0
E-C/1245	0.20	0.10	0.01	200	65	32	3
F-C/5987	0.12	0.16	0.14	120	29	38	33
F-C/4856	0.40	0.40	0.10	400	44	44	11
F-C/4855	0.40	0.40	0.00	400	50	50	0
F-C/4856	0.10	0.10	0.05	100	40	40	20
F-C/6022	0.00	0.10	0.00	0	0	100	0
F-C/6022	0.00	0.10	0.00	0	0	100	0
F-C/6022	0.00	0.10	0.00	0	0	100	0
F-C/6022	0.10	0.20	0.05	100	29	57	14
F-C/4854	0.10	0.20	0.01	100	32	65	3
F-C/6022	0.10	0.40	0.20	100	14	57	29
F-C/4958	0.40	0.10	0.05	400	73	18	9
F-C/4854	0.40	0.40	0.05	400	47	47	6
F-C/4852	0.10	0.20	0.05	100	29	57	14
F-C/4856	0.00	0.05	0.05	0	0	50	50
F-C/6017	0.10	0.10	0.00	100	50	50	0
F-C/4967	0.00	0.00	0.05	0	0	2	98
CASCABELES	2.00	0.10	0.00	2000	95	5	0
A-C/4872	1.00	0.40	0.10	1000	67	27	7
A-C/4872	0.00	0.10	0.01	0	0	91	9
C/4872	0.10	0.00	0.05	100	67	0	33
C/4866	0.20	0.10	0.05	200	57	29	14
C/4867	0.10	0.10	0.05	100	40	40	20
C/4867	0.01	0.01	0.01	10	33	33	33
C/4867	0.10	0.01	0.01	100	83	8	8
A1.1	0.41	1.00	0.10	410	27	66	7
A1.2	0.20	1.00	0.10	200	15	77	8
A1.4	0.20	1.00	0.10	200	15	77	8
A1.5	1.00	1.00	0.05	1000	49	49	2
A1.6	0.10	0.40	0.01	100	20	78	2
A1.7	0.10	0.20	0.05	100	29	57	14
A1.8	0.00	0.40	0.05	0	0	89	11
A1.9	0.10	0.10	0.00	100	50	50	0
As= N. A.							
ESPECIALES	%Sn	%As	%Sb	Sn(ug/g)	Sn	As	Sb
S/N	0.05	0.00	0.00	46	98	2	0
CSI-1195	0.10	0.00	0.50	98	16	0	83
CSI-2300	0.03	0.00	0.00	30	97	3	0
CSI-497	0.05	0.00	0.22	46	17	0	82
CSI-2702	0.34	0.00	0.30	340	53	0	47
CSI-2702	0.06	0.00	0.22	62	22	0	78

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla A.2.19 Porcentajes de composición por (valores normalizados)-Regiones.

ZONA CENTRO

CASCABELES	%Sn	%As	%Sb	Sn(ug/g)	Sn	As	Sb
30.223	0.00	0.10	0.00	0	0	100	0
30.9555	0.20	0.40	0.03	200	32	63	5
23753	7.00	0.00	0.00	7000	100	0	0
23752	4.70	0.00	0.00	4700	100	0	0
23752	0.00	0.00	0.00	0	0	50	50
C/10096d	0.10	0.40	0.05	100	18	73	9
C/10096a	0.10	0.40	0.05	100	18	73	9
C/10096b	0.10	0.40	0.05	100	18	73	9
C/10096c	0.00	0.00	0.01	0	0	0	100
S/N	0.00	1.00	0.01	0	0	99	1
S/N	0.00	0.00	0.01	0	0	0	100
S/N	0.00	0.00	0.01	0	0	0	100
S/N	0.00	0.00	0.01	0	0	0	100

Tabla A.2.20 Porcentajes de composición por (valores normalizados)-Regiones.

ZONA NORTE

CASCABELES	%Sn	%As	%Sb	Sn(ug/g)	Sn	As	Sb
CG6886	0.00	0.37	0.99	0.2	0	27	73
CG6876	0.00	0.11	0.22	0.4	1	34	65
CG8341	0.00	0.08	0.11	0.2	1	41	58
CG8126A	0.02	0.01	0.01	2.3	48	23	29
CG7076	0.00	0.01	0.01	0.2	10	50	40
CG8270	0.01	0.01	0.00	0.5	26	68	5
CG1820C	0.04	0.02	0.01	4.4	60	22	18
CG2075	0.01	0.02	0.03	1.3	23	33	44
CG7840	0.01	0.03	0.02	1.4	25	46	29
CG8384	0.00	0.01	0.01	0.3	12	46	42
11) spilled	0.18	0.00	0.00	180	96	2	2
12) Copper	0.00	0.03	0.04	1	2	39	59
13) M. bell	0.01	0.01	0.01	8	26	45	29
14) Small B.	0.09	0.13	0.01	89	40	58	2
15) Fragment	0.01	0.17	0.01	9	5	90	5
16) Bell F.	0.01	0.02	0.01	8	23	51	26
17) B. Frag.	0.01	0.03	0.02	10	18	50	32
18) Tinkler B.	0.01	0.01	0.01	9	31	45	24
19) Bell-1	0.01	0.02	0.02	13	25	41	33
20) Bell-2	0.00	0.02	0.00	3	14	71	14

Tabla A.2.21 Porcentajes de composición por (valores normalizados)-Regiones.

LAS MARGARITAS

Muestra	Sn	As	Sb
(1) Cascabel 1	44	46	10
(2) Cascabel 2	51	39	10
(3) Cascabel 3	29	62	8
(4) Cascabel 4	9	84	7
(5) Medio cascabel	48	44	8
(6) Fragmento de cascabel 1	45	47	8
(7) Fragmento de cascabel 2	1	93	7
(8) Anillo suspensión de un cascabel	99	1	0

720
FALLA DE ORIGEN

APÉNDICE 3

Gráficas y Diagramas

DIAGRAMA A 3.1

Fe - Sb - Sn

○ = Cascabeles

♣ = Cinceles

◆ = Anillos

⊙ = R. Metal

△ = Hacha

☆ = Agujas

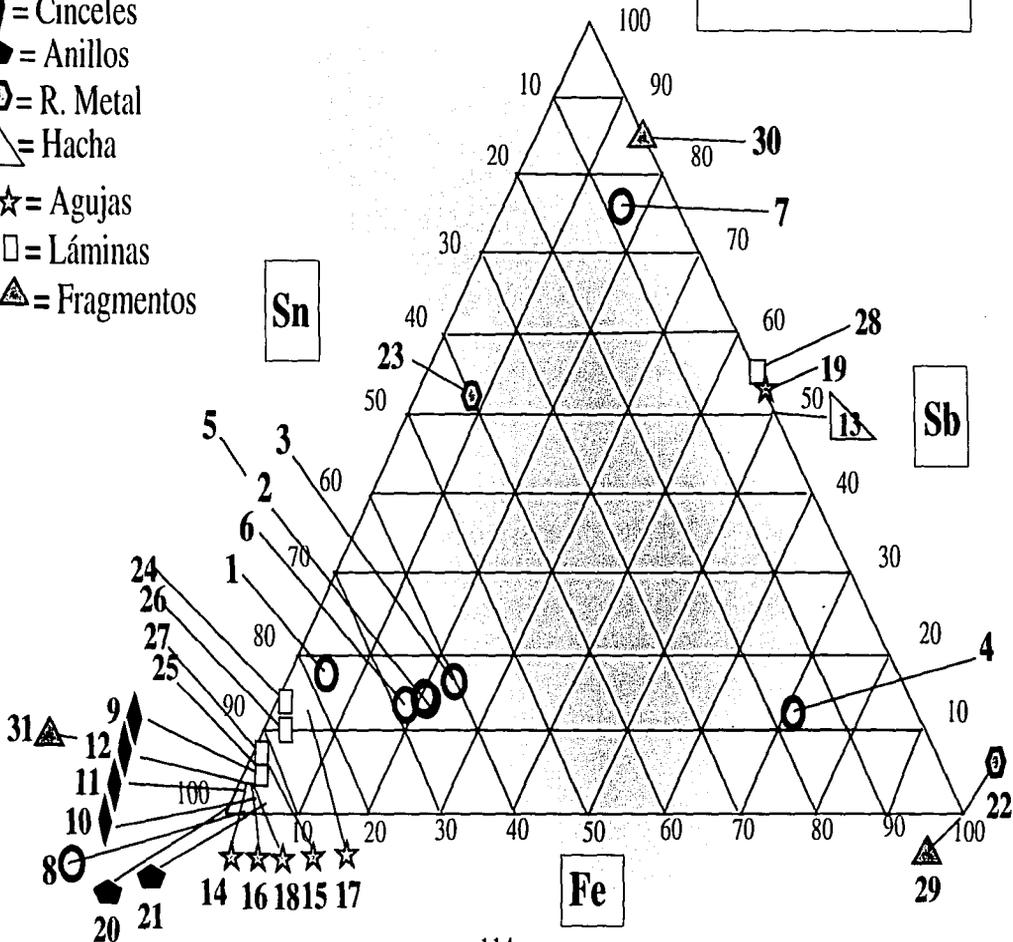
□ = Láminas

▲ = Fragmentos

Sn

Sb

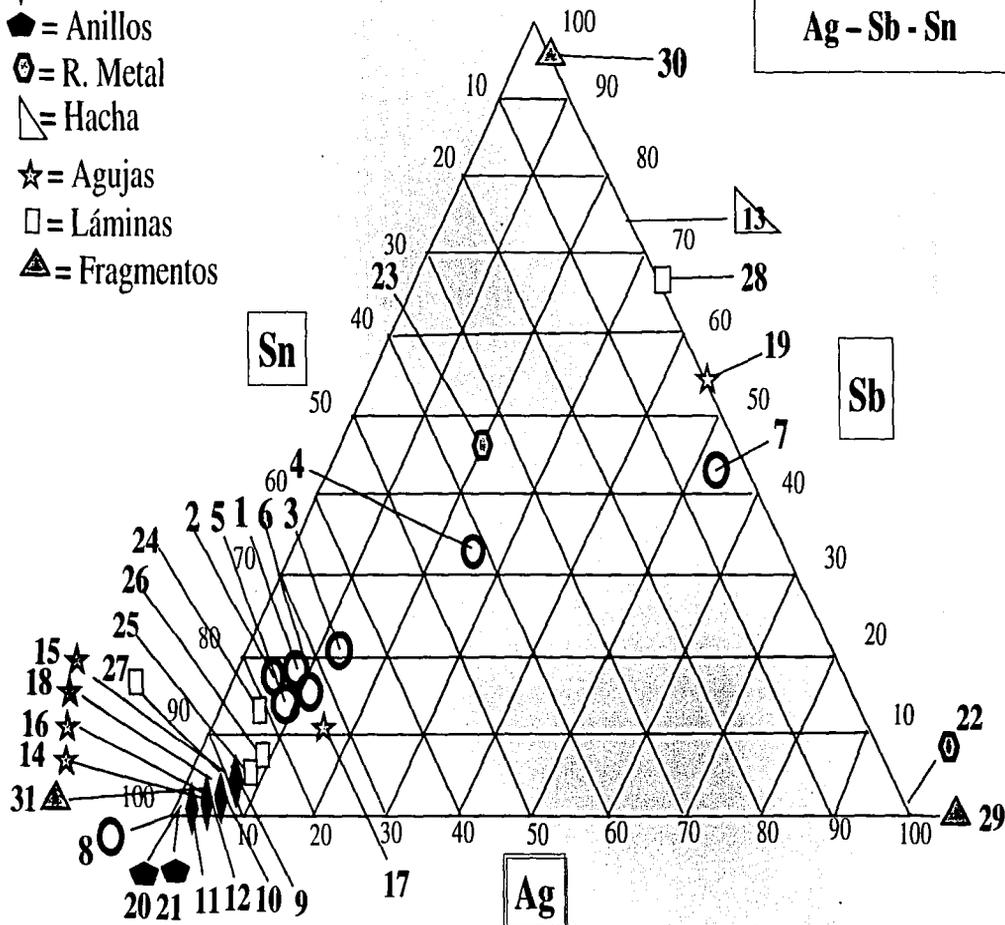
Fe



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- = Cascabeles
- ◆ = Cinceles
- ◆ = Anillos
- ⊙ = R. Metal
- ◻ = Hacha
- ☆ = Agujas
- ◻ = Láminas
- ▲ = Fragmentos

DIAGRAMA A 3.2
Ag - Sb - Sn



TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

- = Cascabeles
- ◆ = Cinceles
- ◆ = Anillos
- ⊖ = R. Metal
- △ = Hacha
- ☆ = Agujas
- = Láminas
- △ = Fragmentos

DIAGRAMA A 3.3
Ag - Sb - As

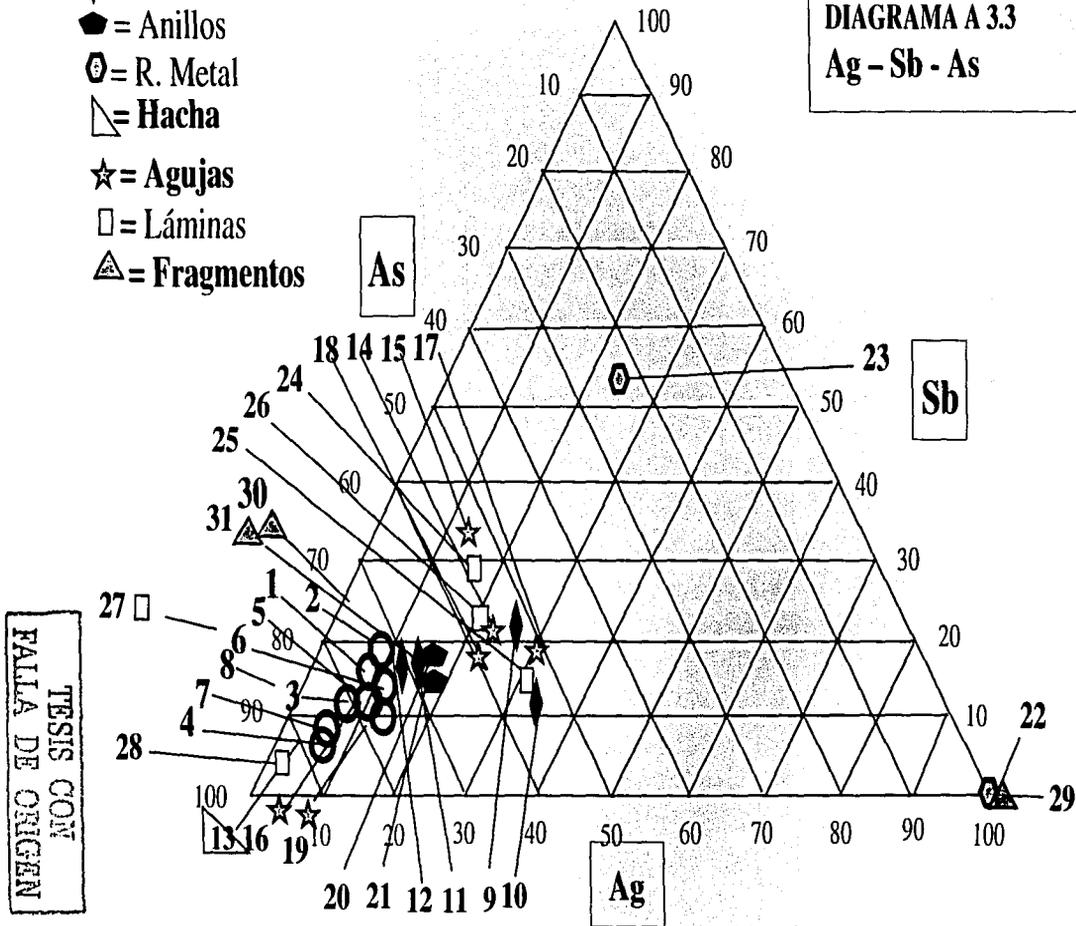
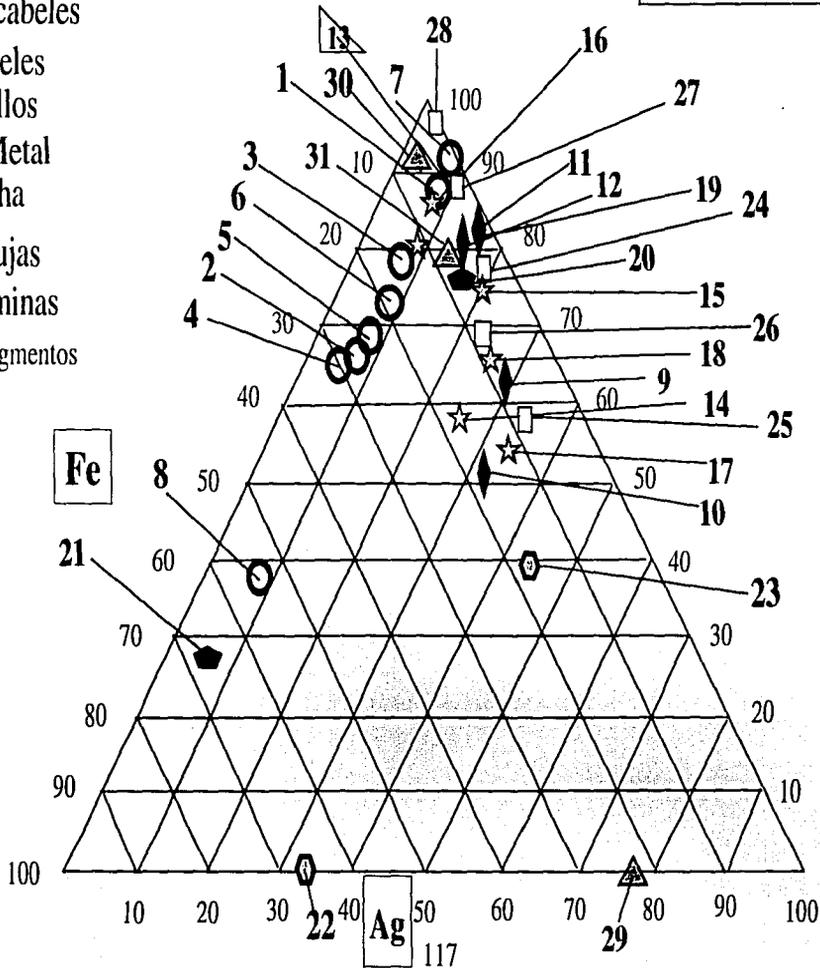


DIAGRAMA A 3.4
Ag - As - Fe

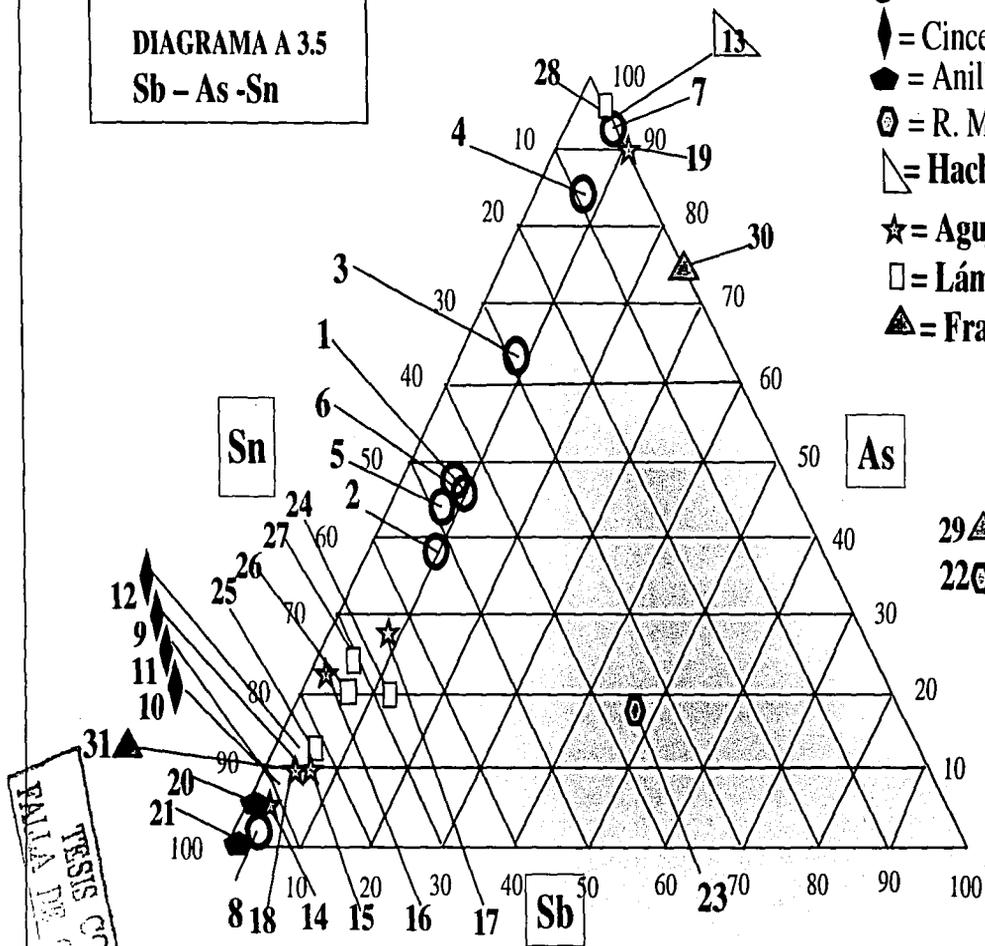
- = Cascabeles
- ◆ = Cinceles
- ◼ = Anillos
- ⊙ = R. Metal
- △ = Hacha
- ☆ = Agujas
- = Láminas
- △ = Fragmentos



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

DIAGRAMA A 3.5
Sb - As - Sn

- = Cascabeles
- ◆ = Cinceles
- ◆ = Anillos
- ⊙ = R. Metal
- △ = Hacha
- ☆ = Agujas
- = Láminas
- ▲ = Fragmentos



▲ = Zona Norte

○ = Las Margaritas

◆ = Zona Centro

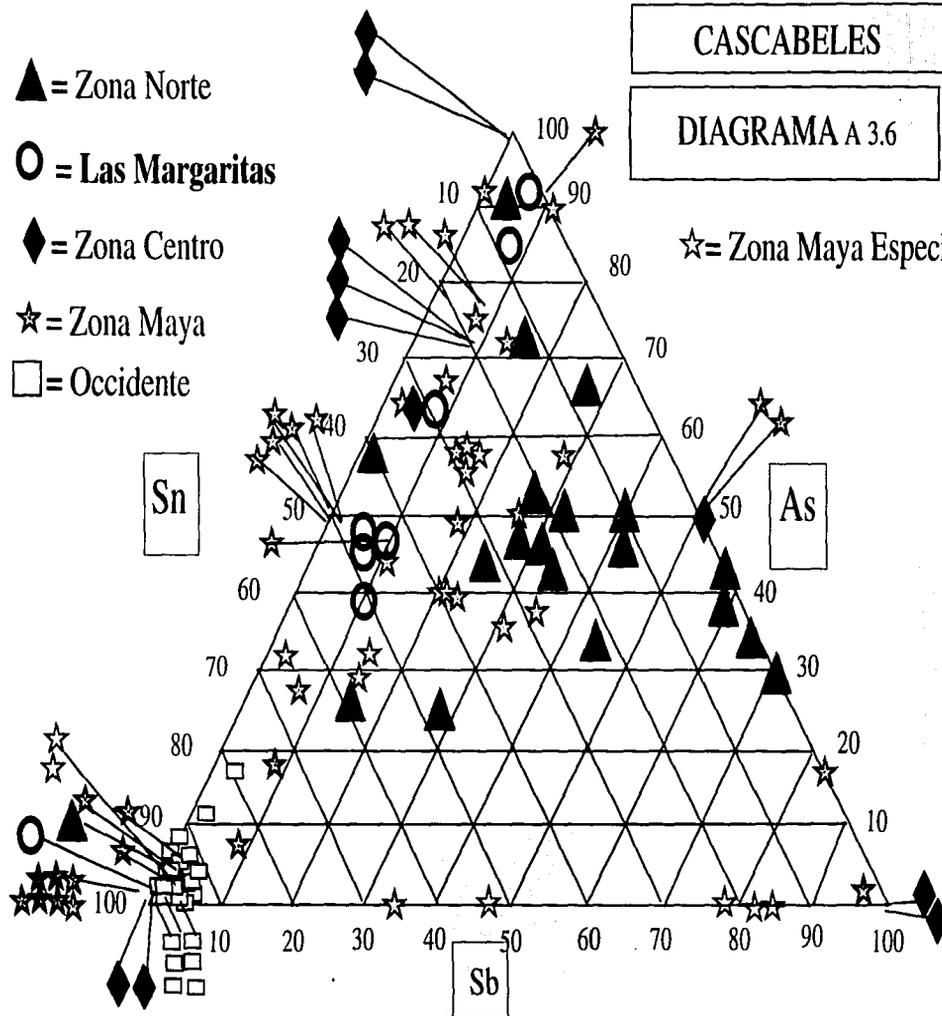
☆ = Zona Maya

□ = Occidente

CASCABELES

DIAGRAMA A 3.6

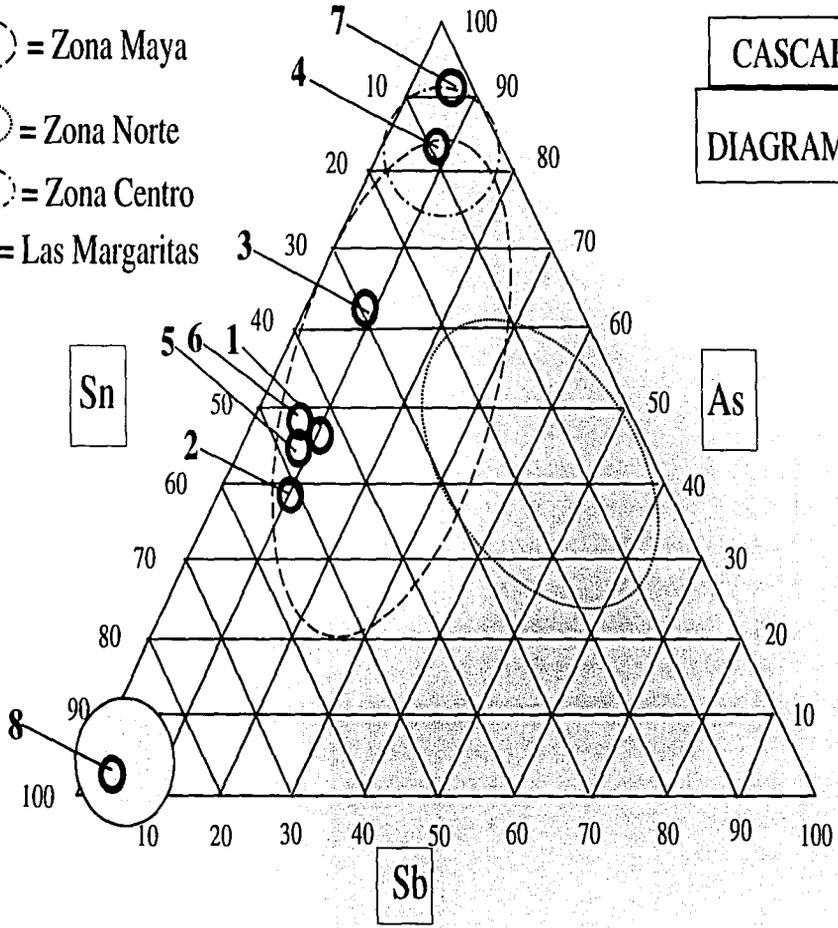
☆ = Zona Maya Especiales



TESIS CON
FECHA DE ORIGEN
1980

- = Zona Occidente
- (dashed) = Zona Maya
- (solid) = Zona Norte
- (dotted) = Zona Centro
- (with dot) = Las Margaritas

CASCABELES
 DIAGRAMA A 3.7

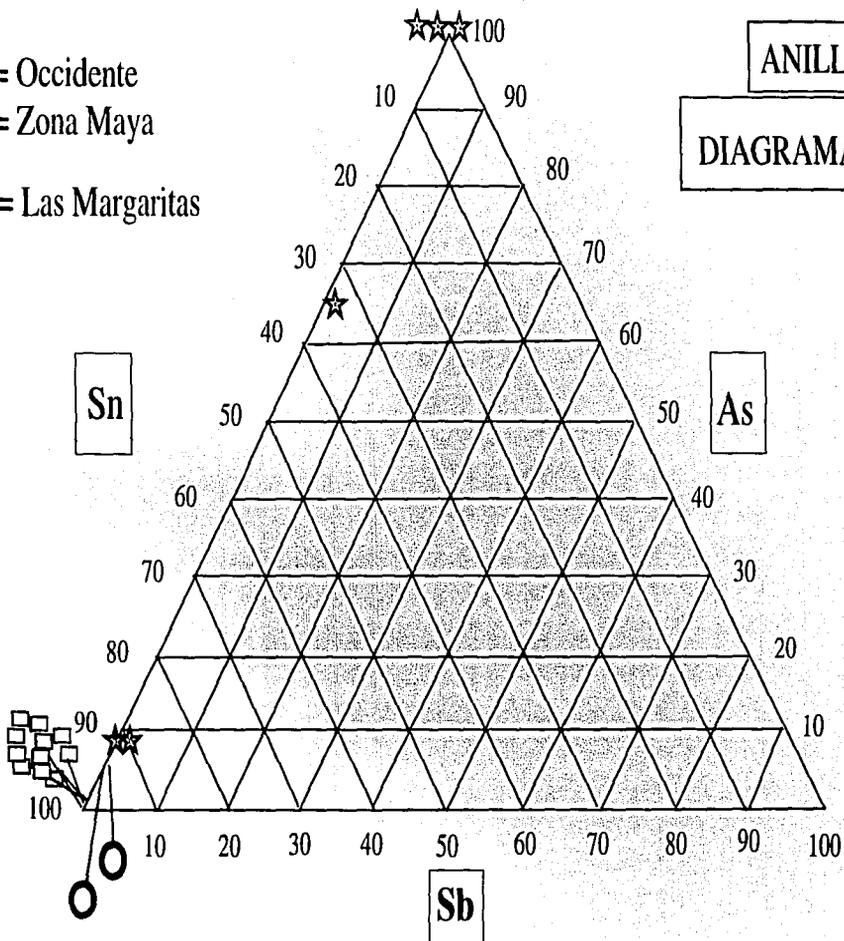


TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

- = Occidente
- ☆ = Zona Maya
- = Las Margaritas

ANILLOS

DIAGRAMA A 3.8

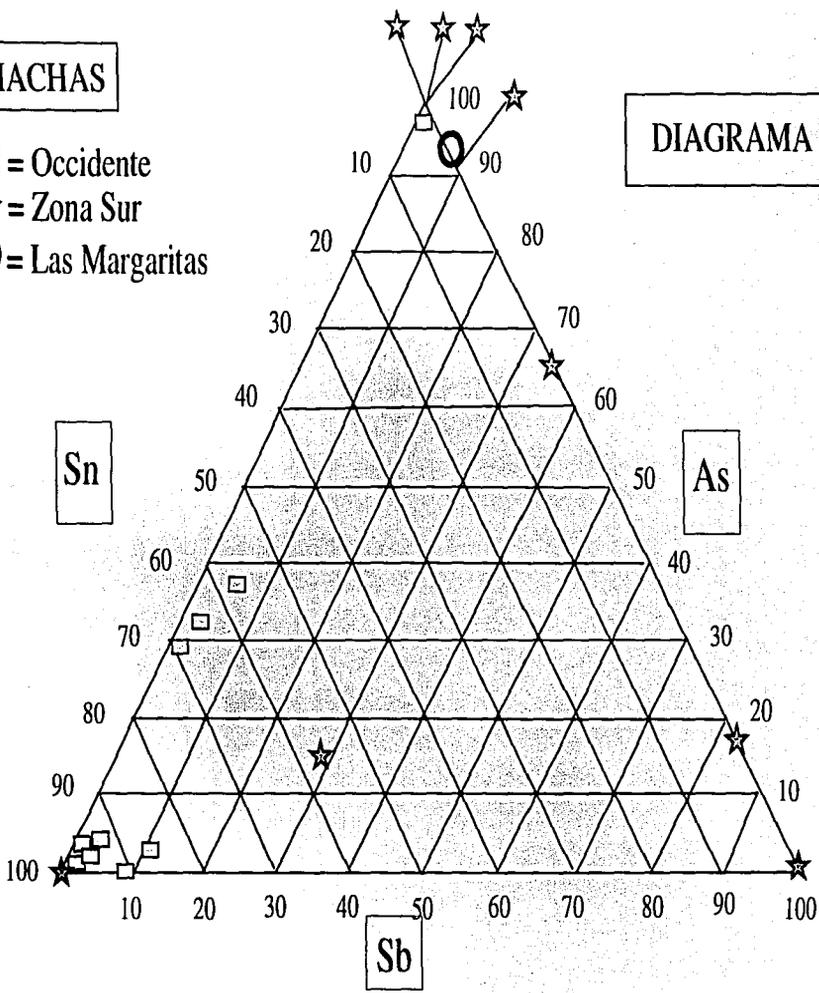


TESIS COT
 FALLA DE CUGEN

HACHAS

- = Occidente
- ★ = Zona Sur
- = Las Margaritas

DIAGRAMA A 3.9



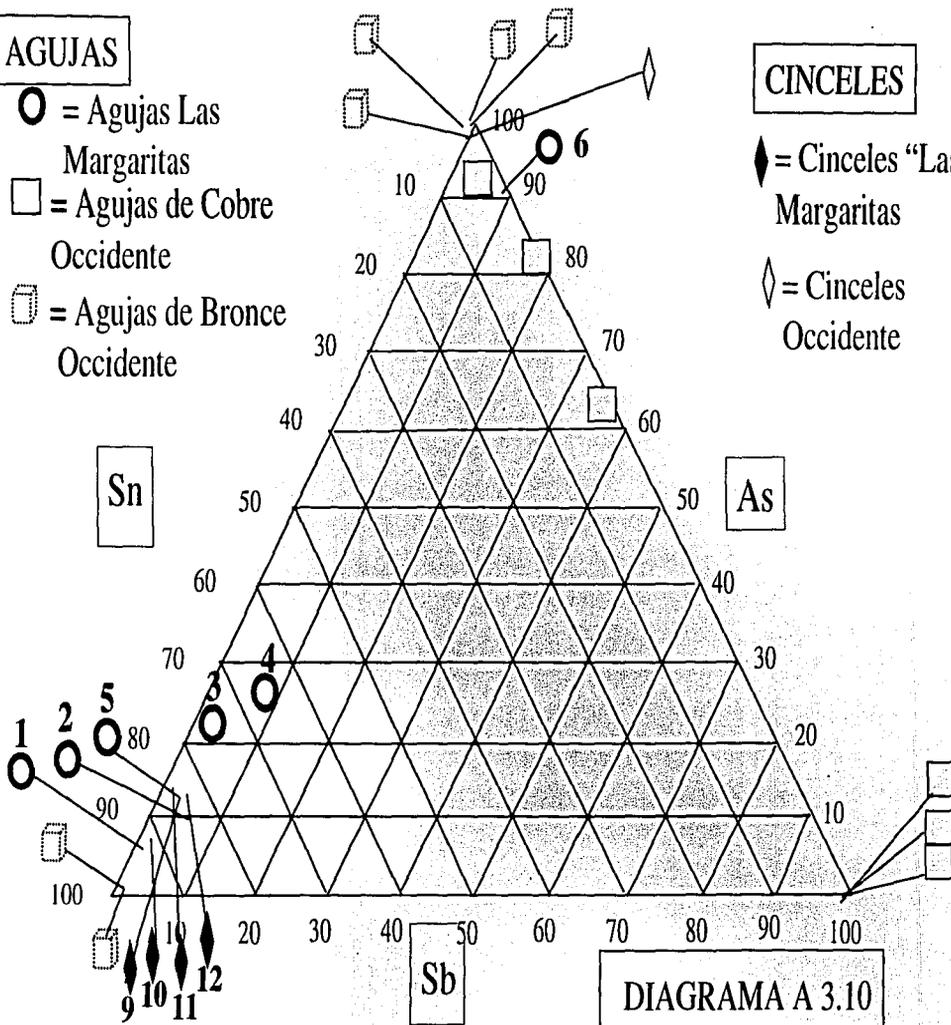
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

AGUJAS

- = Aguja Las Margaritas
- = Aguja de Cobre Occidente
- ◻ = Aguja de Bronce Occidente

CINCELES

- ◆ = Cinceles "Las Margaritas"
- ◊ = Cinceles Occidente



TESIS CON
 FALLA DE CUBEN