Ciencia Nicolaita 94:137-147; Agosto de 2025 https://doi.org/10.35830/cn.vi94.861

El impacto ambiental de la producción de cobre en el Michoacán Colonial

The environmental impact of copper production in the Colonial Michoacán

Roberto Lindig Cisneros[1]*, Liliana Sánchez Montaño[1], José Luis Punzo Díaz[2]

[1] Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Morelia.
[2] Instituto Nacional de Antropología e Historia — centro INAH. Michoacán

Historial
Manuscrito recibido: 6 de abril de 2025
Manuscrito aceptado: 7 de agosto de 2025
Manuscrito publicado: agosto 2025

***Autor para correspondencia**
Roberto Lindig-Cisneros
rlindig@iies.unam.mx
ORCID: 0000-0003-2542-7038

Resumen

El impacto ambiental de las actividades humanas ha influido en el colapso de sociedades antiguas como las mayas y teotihuacanas, debido a cambios ambientales. En Michoacán, la fundición de cobre comenzó en tiempos prehispánicos, dejando efectos en el suelo y la vegetación, y durante la colonia, la minería de cobre aumentó junto con la explotación forestal. El presente estudio analiza el impacto de la minería en los períodos prehispánico y colonial, con base en documentos históricos y registros arqueológicos. Aunque la deforestación no fue extensa, el impacto local fue significativo, con residuos de la metalurgia que siguen contaminando el suelo por metales pesados. Este trabajo destaca la importancia de comprender el impacto histórico de las actividades humanas para evaluar sus efectos actuales y establecer estrategias de manejo sustentable a largo plazo.

Palabras clave: deforestación; impacto ambiental; minería; occidente de México.

Abstract

The environmental impact of human activities has influenced the collapse of ancient societies such as the Maya and Teotihuacan, due to environmental changes. In Michoacán, copper smelting began in pre-Hispanic times, leaving effects on soil and vegetation, and during the colony, copper mining increased along with logging. This study analyzes the impact of mining in the pre-Hispanic and colonial periods, on the basis of historical documents and archaeological records. Although deforestation was not extensive, the local impact was significant, with metallurgical residues still affecting soil by heavy metals. The study highlights the importance of understanding the historical impact of human activities to assess their current effects and to stablish sustainable management strategies in the long term.

Keywords: deforestation; environmental impact; mining; Western Mexico.

Introducción

El impacto ambiental de las actividades humanas en tiempos pretéritos puede generar consecuencias a largo plazo cuyos efectos son significativos en el presente. Por otro lado, la controversia es considerable sobre el papel que tuvo la degradación ambiental en el colapso de sociedades. Ejemplos de esto en Mesoamérica son abundantes, e incluyen a Teotihuacán y la zona Maya. Tal vez el más citado es el caso de la civilización maya del período Clásico que causó que muchas ciudades del sur del territorio ocupado colapsaran y los centros de población del norte cobraran importancia. Este proceso se ha atribuido a múltiples causas, incluyendo conflictos sociales, deforestación y sequía, o la combinación de sucesos, destacando el papel combinado de la sequía y conflictos sociales como causales de este declive tanto en el Clásico como en el Postclásico (Kennett *et al*., 2022). Otro ejemplo citado frecuentemente sobre el papel de la degradación ambiental en el colapso de una civilización es el de la isla de Rapa Nui (la Isla de Pascua), sin embargo, estudios recientes cuestionan la validez de esta interpretación al proponer que no se cuenta con evidencias sobre un colapso previo al contacto con europeos (DiNapoli *et al.,* 2020).

Los casos anteriores ilustran el hecho de que el colapso de ciudades, regiones o civilizaciones, es multifactorial,

Copyright © Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo • ISSN 2007-7068

pero no invalidan la importancia de considerar el impacto ambiental de sociedades del pasado. En un estudio previo (Osuna-Vallejo *et al.,* 2022), en el sitio arqueológico de Jicalán Viejo, se pudo determinar que los vestigios arqueológicos tienen un efecto diferencial, de acuerdo con su origen, sobre la presencia y desarrollo de la vegetación, tanto silvestre como cultivada. En este sitio, desde épocas precolombinas se benefició y trabajó el cobre, en la actualidad es posible detectar las consecuencias de estas actividades en la propia vegetación al detectar concentraciones elevadas de este elemento (entre 31 y 73 µg/g) en el tejido vegetal.

El caso de Jicalán Viejo plantea la cuestión de cuál fue el impacto de las actividades del aprovechamiento del cobre en el Occidente de México en el período comprendido desde un poco antes de la llegada de los españoles al periodo colonial. Roskamp (2010) resalta la gran importancia de la metalurgia en los pueblos del Occidente de México, específicamente en el periodo Postclásico en Michoacán. Comenta que los metales se consideraban sagrados y según sus creencias estos emergían de los dioses y les pertenecían a ellos. Así, la explotación de los recursos y los procesos de fundición requerían permiso y asesoramiento de las fuerzas divinas, obtenidas a través de rituales especiales realizados antes, durante y después de los procesos metalúrgicos.

Metodología

A partir de una revisión de documentos históricos y estudios sobre la producción de cobre se reconstruye la historia de la explotación y beneficio de este metal desde la época prehispánica y en particular en la época colonial. Con base en los registros históricos se realizaron estimaciones sobre la producción de cobre para el período mencionado y se calculó el impacto ambiental de esta actividad. Así mismo, se llevaron a cabo prospecciones arqueológicas en distintas zonas del estado de Michoacán, donde se localizaron y registraron sitios que presentan materiales de la producción metalúrgica antigua, especialmente las escorias de dicha producción llamadas "querendas" en purépecha, así como vestigios de hornos. Para estimar el impacto sobre los bosques se partió del estudio de Rose *et al*. (2020) quienes reproducen métodos de extracción de cobre de calcopirita y calculan el consumo de combustible, y la madera disponible por hectárea a partir de los estudios de Vásquez-Fabián *et al.* (2017) para bosques con dominancia de *Pinus pseudostrobus* en el estado de Oaxaca, dado que es la especie de pino más común en los bosques de Michoacán en las cercanías de la mayoría de los sitios de fundición históricos y las estimaciones de Hernández-Moreno *et al.* (2020), para bosques de la zona de la mariposa monarca.

Resultados y discusión

La actividad metalúrgica alrededor del cobre se puede dividir en tres fases, la primera en sus orígenes (700-900 D.C.), periodo en que llega esta tecnología desde Sudamérica, posteriormente un periodo de expansión de entre los años 900 al 1300, cuando aparecen objetos metálicos en lugares tan norteños como el Suroeste de EUA y finalmente, un periodo del 1300 a la llegada de los españoles, donde se puede ver una especialización y regionalización en la producción. Fue en este periodo final que el auge de la actividad minera de cobre en Mesoamérica cobró una gran importancia con el establecimiento del Señorío Tarasco y las conquistas de este hacia la Tierra Caliente en el siglo XV cuestión que continuó durante todo el siglo XVI ya tras la llegada de los españoles a la región.

En la primera fase, los principales usos eran suntuarios y rituales y se utilizó mayormente el cobre nativo que se trabajó en frío o con el método de cera perdida. En la segunda y tercera fase se dieron innovaciones importantes como el uso de aleaciones (bronce de cobre–estaño y cobre–arsénico, cobre-oro, cobre-plata, además de aleaciones ternarias de cobre–arsénico–estaño y cobre–plata–oro), lo que amplió la gama de objetos elaborados y sus usos (Trujillo 2013), fue en este último periodo cuando la explotación de las minas en Tierra Caliente fue más organizada desde el corazón del Señorío Tarasco en Tzintzuntzan. Sobre este importante periodo existe un documento titulado "Minas de cobre en Michoacán" elaborado por Vasco de Quiroga en donde se reunió información para el conocimiento de los reyes españoles sobre las minas de cobre en la Nueva España, para su explotación. Este documento, hecho en 1533 con ayuda de cinco fundidores indígenas, confirma que los tarascos contaban con minas de cobre propias desde mucho antes de la llegada de los españoles y que tenían amplios conocimientos tecnológicos que fueron usados por los europeos.

Las minas, de acuerdo con el documento, se localizaban en la Huacana, Turicato, Churumuco, Cinagua, Cucarán, Pungarabato, Guayameo, Tancítaro, Tacámbaro, Coyura, Uruapan, Cucamala, Tepalcatepec, Ajuchitlán y Feriguán (Uribe Salas 1996). Gracias a los trabajos arqueológicos realizados y el estudio

de dichas fuentes históricas, hemos podido localizar trabajos mineros de este periodo en Churumuco, Cosian e Inguarán, que posiblemente abastecieron en época prehispánica buena parte de la producción, lo cual se representa en la **Figura 1**.

No obstante, con la llegada de los españoles no desaparecieron las prácticas alrededor del trabajo del cobre, de hecho, como menciona Castro Montes (2019) se resignificó perdiendo el carácter social y religioso que tuvo en la época precolombina para ajustarse a los intereses económicos y militares de España. La mayor parte de las explotaciones de cobre en la región sucedieron en el cerro de Inguarán, y a partir del siglo XVII, la Corona intervino y embargó a los indígenas la mina del Rey o de San Bartolomé, que era la más grande encontrada en este cerro.

Gavira (2023) comenta que el comercio del metal no estaba prohibido siempre y cuando las minas estuvieran registradas y los dueños pagaran su respectivo impuesto a la Corona. Pero a partir de 1620 ya se había prohibido a los particulares vender cobre y desde el año 1780 la Corona española intentó controlar aún más la producción y su precio en la Nueva España. Gracias a esto, el mercado novohispano sufrió una crisis de suministro y se dieron prácticas de contrabando, lo que en realidad terminó beneficiando a pequeños productores, pues lo vendían a los mercados regionales aprovechando la carencia. El cobre empezó a ser más demandado durante el siglo XVIII para fines monetarios y fabricación de armas. Por esta razón en 1780 se tomaron medidas más rígidas para controlar su explotación, acopio, distribución, calidad y precio.

En resumen, el monopolio no afectó realmente de forma negativa la producción de cobre en general, pero si había una producción de cobre no controlada por la Corona y por lo mismo no hay forma de estimarla. Como menciona Gavira (2023, p.11), lo que ocurrió a partir de 1780 fue un reacomodo del comercio del metal que fomentó su extracción por pequeños productores.

Existen en México distintos sitios donde se realizó la extracción y fundición de cobre, como Jicalán Viejo, un poblado localizado al sur del estado de Michoacán (Osuna-Vallejo *et al.*, 2022). Aquí se desarrolló la tecnología para la fundición como se percibe por los restos y herramientas encontrados en el sitio. Los autores comentan que seguramente el cobre utilizado fue extraído de Inguarán, que es una de las minas de mayor tamaño tanto en la época precolombina como

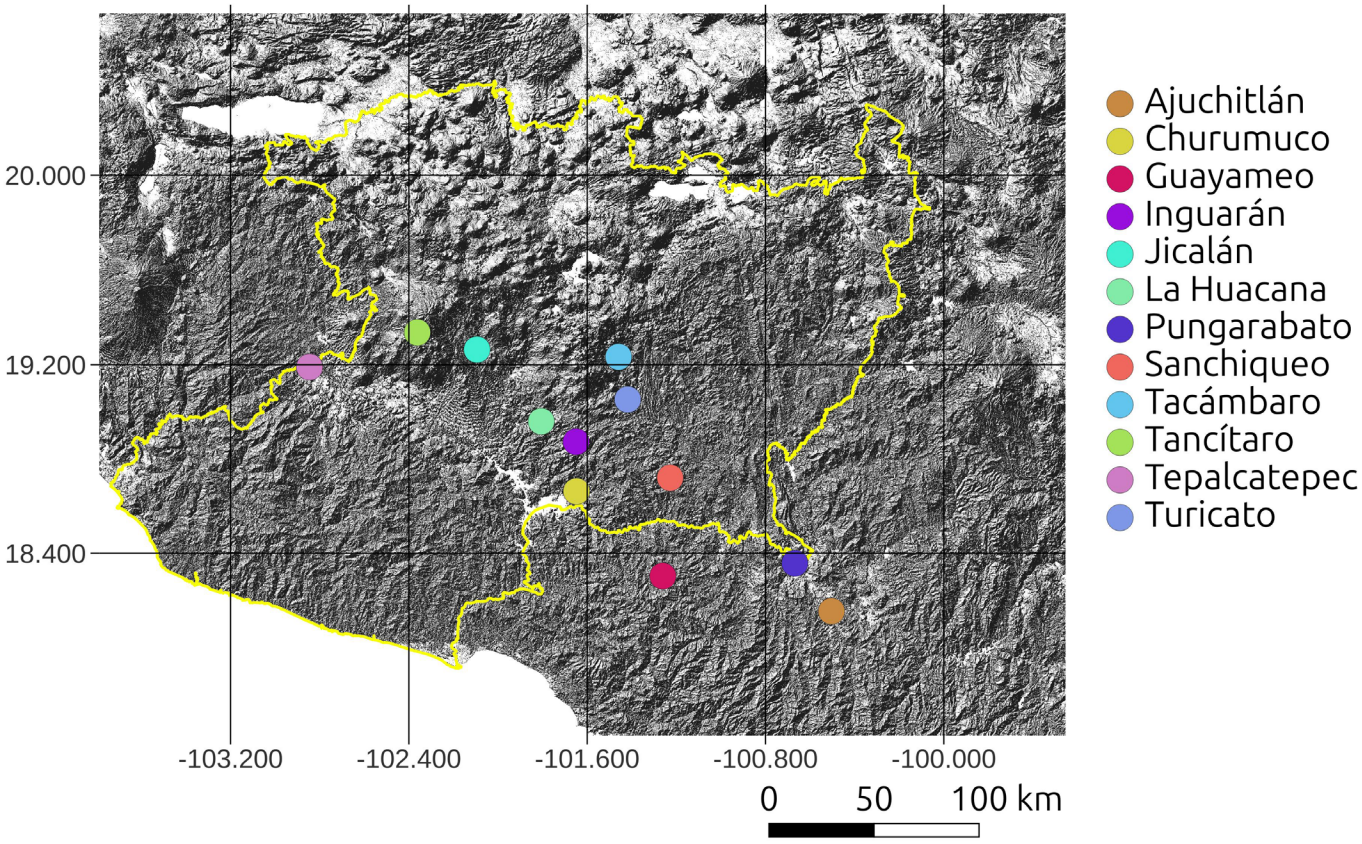

Figura 1. Principales sitios de producción y fundición de cobre en la época prehispánica.

en la Colonial, localizada a unos sesenta kilómetros al sureste del sitio, en la zona montañosa de Tierra Caliente en Michoacán (Osuna-Vallejo *et al.*, 2022).

La primera referencia concreta sobre la producción de cobre en lingotes ya en la época colonial corresponde al período entre 1548 y 1550. Comentan que los fundidores de Jicalán daban al encomendero de Uruapan seis cargas pequeñas de cobre, mantas, pañuelos y manteles cada ochenta días. En total se entregaban veinticuatro cargas anuales, o 950 kilogramos de cobre, que, en esa época, era medido en quintales, unidad de peso española antigua que equivalía a 100 libras castellanas, o a 46 kilogramos, aproximadamente (Castro Montes 2019). Entonces, al dividir los 950 kg de cobre sobre 46 daría un total de 20.65 quintales de cobre producidos en esta región.

Al conocer la cantidad de cobre producida, nos podemos dar una idea sobre el trabajo de metalurgia de esta zona para mediados del siglo XVI. Podemos percatarnos de que no hay minas de cobre alrededor de Jicalán, sino a 60 kilómetros de distancia del mismo, por lo tanto, tuvieron que haber existido caminos de traslado del mineral para poder realizar la fundición primaria. Como mencionan Osuna-Vallejo *et al.* (2022) en este sitio se trabajaba el metal en términos de la fundición primaria y de la elaboración de objetos diversos (como hachas y azuelas) a partir de los lingotes obtenidos de la fundición. Al mismo tiempo, cabe destacar, que el trabajo metalúrgico no se interrumpió con la Conquista, sino que continuó y los mismos españoles utilizaron el conocimiento de los habitantes de la zona sobre la fundición metalúrgica para su beneficio, pero proporcionando herramientas y tecnologías nuevas.

La cantidad de cobre producido en el Occidente de México anualmente variaba en cada año, y no existen datos detallados al respecto. Gavira (2023) hace notar que las cantidades del metal enviadas a España variaban considerablemente, así, en el año 1780 se enviaron cerca de 3000 quintales desde la Nueva España. En años sucesivos se aumentaron las cifras hasta 4000 y 5000 quintales. De hecho, en 1792 la cantidad alcanzó 10800 quintales pero en 1793 bajó a 7300 quintales. Castro Montes (2019), indica que en el año 1528 se mandó a la Casa de Munición de México desde Michoacán la cantidad de 800 quintales de cobre. Por su parte, Uribe Salas (1993) señala que en 1800 la producción de Nueva España fue de 9684 quintales, y la mayoría de esta producción provenía de Michoacán, no obstante, la demanda no se cumplía, pues esta era en 1799 de 20300 quintales, más del doble de la cantidad producida.

Uribe Salas (1996) describe cómo en 1533 se interrogó a fundidores indígenas sobre sus técnicas de fundición, información plasmada en El Legajo 1204, publicado con el nombre de Las minas de cobre de Michoacán. En este texto se menciona que cada fundidor producía un tejuelo o lingote de cobre al día, estos tenían una medida de 17 centímetros por 3.5 centímetros; y pesaban 4.25 kilogramos, aproximadamente, de tal forma que, siguiendo este ritmo de producción en un mes la producción sería de 30 tejuelos o de 128 kilogramos. Por lo tanto, diez fundidores producirían al mes 1300 kilogramos de cobre, y esto dividido entre 46 (un quintal= 46 kg) (Castro Montes 2019), daría un total de 339 quintales para este año, pero no se menciona el origen del metal.

Según Castro Montes (2019) en el mismo Legajo 1204 describen que un hombre indígena de Michoacán y fundidor de las minas La Huacana, Churumuco y Cosian aseguró que en un día producían un pedazo o un tejuelo de cobre del ancho de un "jeme", del grueso de una mano y del ancho de dos dedos. Un "jeme" era una medida de longitud antigua y es la distancia que existe desde la extremidad del dedo índice hasta el pulgar cuando se extienden por completo (Castro Montes 2019). Así, esta autora señala en base a estas medidas, que el peso aproximado del lingote era de entre 1.6-2.4 kg hasta 4.5 kg. Menciona también que la producción de cobre era bastante mayor en la época prehispánica que en la época colonial temprana, pues había una mayor cantidad de trabajadores en las minas (Castro Montes 2019). Un relato menciona que un fundidor de la Huacana confirmó que en la época del Cazonci (antes de la conquista) 40 fundidores podían producir 10 cargas de cobre en 10 días, pero en 1533 cinco personas producían solamente un tejuelo al día. Según el Legajo 1204, una carga es lo que puede cargar una persona, 23 kilogramos aproximadamente, y una carga son 20 tejuelos; así, en la época del Cazonci los fundidores de la región La Huacana podrían producir un aproximado de 230 kilos de cobre en 10 días (Castro Montes 2019), lo cual se traduce en 8395 kg de cobre divididos entre 46 da un total de 182.5 quintales de cobre anuales. En 1533 los 4.25 kg fundidos por 5 trabajadores multiplicado por 365 días al año (esto, si no descansaran) da un total de 1551.25 kg, dividido sobre 46 serían solamente 33.72 quintales de cobre al año (Castro Montes, 2019)

Castro Montes (2019) indica que durante la época del Cazonci los fundidores trabajaban el cobre solamente cuando este lo demandaba y que mientras no lo hacía, ellos trabajaban sus cultivos. Con esta información se puede notar como la minería no era tan demandante, pues no requería de un empleo de tiempo completo.

En 1542 se menciona que en los libros de tributos que la Huacana reportaba, se debían realizar nueve entregas

de 40 pedazos de cobre, una cada 40 días. Al realizar las cuentas, serían 18 cargas al año, o aproximadamente 414 kg, y al dividir esta cantidad entre 46 serían 9 quintales de cobre anuales (Castro Montes 2019). Pátzcuaro entregaba 2500 kg de cobre, pero no especifica si es por año o cada 40 días. Al dividir estas cantidades entre 46 daría un total de 54.34 quintales y 495.92 quintales (al multiplicarlo por 9.125 [365/40]) respectivamente, esto en la región de la Huacana.

Por último, en el Legajo 1204 se informó que 40 indios producían 200 tejuelos de cobre en un año, es decir, 10 cargas o 2300 kg. En cambio, el mismo fundidor de la Huacana dio datos más optimistas al plantear que 40 personas podrían producir 10 cargas de cobre en solo 40 días, lo cual significa 50 quintales (2300 kg / 46) o 456.25 quintales (365/40 x 2300 kg / 46), ambas cantidades calculadas para un año.

Con lo antes expuesto, se cuenta con datos sobre la producción aproximada de cobre anual total para distintos años en el período 1528 a 1800. Castro Montes (2019) estima una producción de 800 quintales para el año 1528. Posteriormente, Gavira (2023) menciona en un artículo titulado "El cobre en Michoacán a fines del siglo XVIII: política minera, productores, aviadores y mercados" que en 1780 se enviaban desde Nueva España 3000 quintales de cobre, después de esto dice que aumentaron las cifras hasta 4000 y 5000 quintales, y en el año 1792 la cantidad subió hasta 10800 pero en 1793 bajó a 7300. Finalmente, en el artículo "La explotación del cobre en la Nueva España" Uribe Salas (1993) reporta la producción total de cobre en la Nueva España para 1800 en 9684 quintales. Al recabar esta información se realizó la siguiente línea del tiempo (**Figura 2**).

Dentro del proceso metalúrgico se encuentra el beneficio del cobre, el cual se entiende como el arte y ciencia de extraer los metales de los minerales; gracias a esto es que se pueden emplear los metales en la fabricación de instrumentos variados, abarcando además técnicas como la fundición, aleación, purificación, amalgamación, etc. (Zamora 2003).

Los descubrimientos arqueológicos evidencian que entre los pueblos originarios de América existía un profundo conocimiento práctico sobre la extracción minera, el trabajo con metales y la orfebrería. Por lo tanto, los pueblos mesoamericanos debieron contar con personas especializadas en la búsqueda y localización de yacimientos minerales, que generalmente se explotaban a cielo abierto o a poca profundidad. El conocimiento que adquirían los buscadores durante su prospección se basaba en la comprensión de las propiedades físicas de los minerales y las características del terreno (Jiménez 2017).

Los indígenas americanos poseían una gran habilidad técnica para recolectar piedras, minerales y metales, ubicar minas y procesar estos materiales, los cuales estaban conectados con su cosmovisión. Tras la extracción de los minerales, realizaban el proceso de beneficio de los metales, que a menudo se llevaban a cabo fuera de las minas. Los metales, que variaban en su pureza y, en algunos casos, se utilizaban en aleaciones, pasaban por diversos procedimientos para transformarse en una amplia variedad de objetos. Se usaban hornos de barro, en los cuales se combinaban fragmentos de mineral metálico con carbón. Una vez encendido el horno y alimentado el fuego mediante el aire soplado a través de tubos, conseguían separar el metal, que se recogía en el fondo del horno. En las antiguas minas de cobre, el proceso de purificación del metal se realizaba mediante varias fusiones sucesivas, a veces hasta tres, utilizando

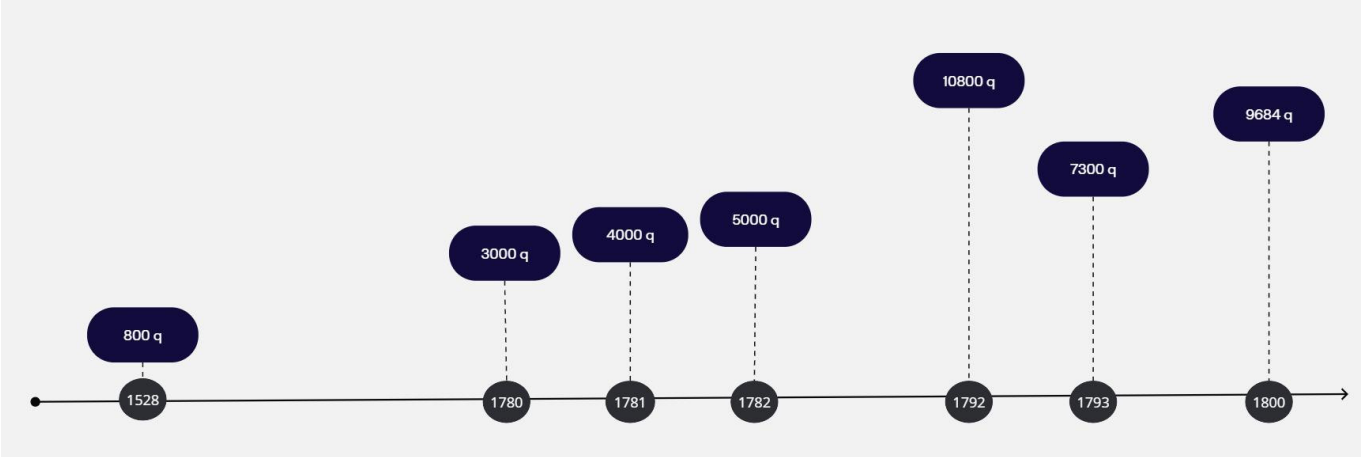

Figura 2. Línea del tiempo de la producción de cobre total anual en la Nueva España.

también los tubos para avivar el fuego (Zamora 2003).

El proceso de beneficio o fundición utilizado durante la época colonial, no sufrió grandes cambios respecto al método empleado por los pueblos locales. Después de moler el mineral, los fundidores lo mezclaban con leña carbonizada y lo ponían en un "crisol" o en "pozos poco profundos de tierra" que estaban revestidos con una mezcla de barro y cenizas. Para aumentar la temperatura, soplaban aire a través de tubos de caña. Según un fundidor indígena, era necesario "fundir dos o tres veces para que quede como ha de estar" y pudiera ser trabajado para fabricar herramientas útiles, especialmente para cortar y labrar la tierra (Uribe Salas 1993).

Para acelerar la producción de cobre y obtener mayores cantidades, los españoles empezaron a utilizar fuelles, generalmente accionados manualmente, y sustituyeron la leña por carbón. Siguiendo las técnicas indígenas, también "calcinaban dos o tres veces el mineral metálico, en un proceso de calcinación conocido como 'reverbereo', previo a la fundición". Dado que la mayoría de los minerales metálicos se asocian con sulfatos, este calentamiento previo servía para eliminar los sulfuros. El cobre generalmente se obtenía en la primera fundición, ya que los concentrados de cobre solían estar bastante puros, lo que contribuyó a la reputación y la alta demanda del cobre michoacano. Cuando el cobre se solidificaba en el pozo, se extraía y se colocaba en planchas. Es importante señalar que los españoles nunca introdujeron hornos de fundición en la región, aunque a finales del siglo XVIII se propuso el uso de hornos ingleses. Estos métodos de extracción y fundición del mineral continuaron siendo utilizados durante toda la época colonial, lo que explica uno de los desafíos que enfrentó la corona para aumentar la producción, especialmente en la segunda mitad del siglo XVIII (Uribe Salas 1993).

El trabajo de beneficio del cobre dejó como evidencia en el paisaje depósitos de escoria, llamadas "querendas" en Michoacán, de los cuales existen varias localidades ubicadas en las cercanías de Santa Clara del Cobre, donde a partir del siglo XVI se concentró la producción de cobre (Punzo 2014; **Figura 3**). Las escorias son subproductos generados durante la fundición de un metal. Generalmente, consisten en mezclas de óxidos ricas en sulfuros. Su composición depende de la naturaleza de los minerales, los concentrados, los fundentes, las condiciones de operación y otros factores variados. Los principales óxidos que se encuentran en la escoria son: óxidos de hierro (FeO, Fe_3O_4), óxidos de aluminio (Al_2O_3), óxidos de silicio (SiO_2), óxido de cobre (CuO) y óxido de calcio (CaO) (Alegría 2014). A

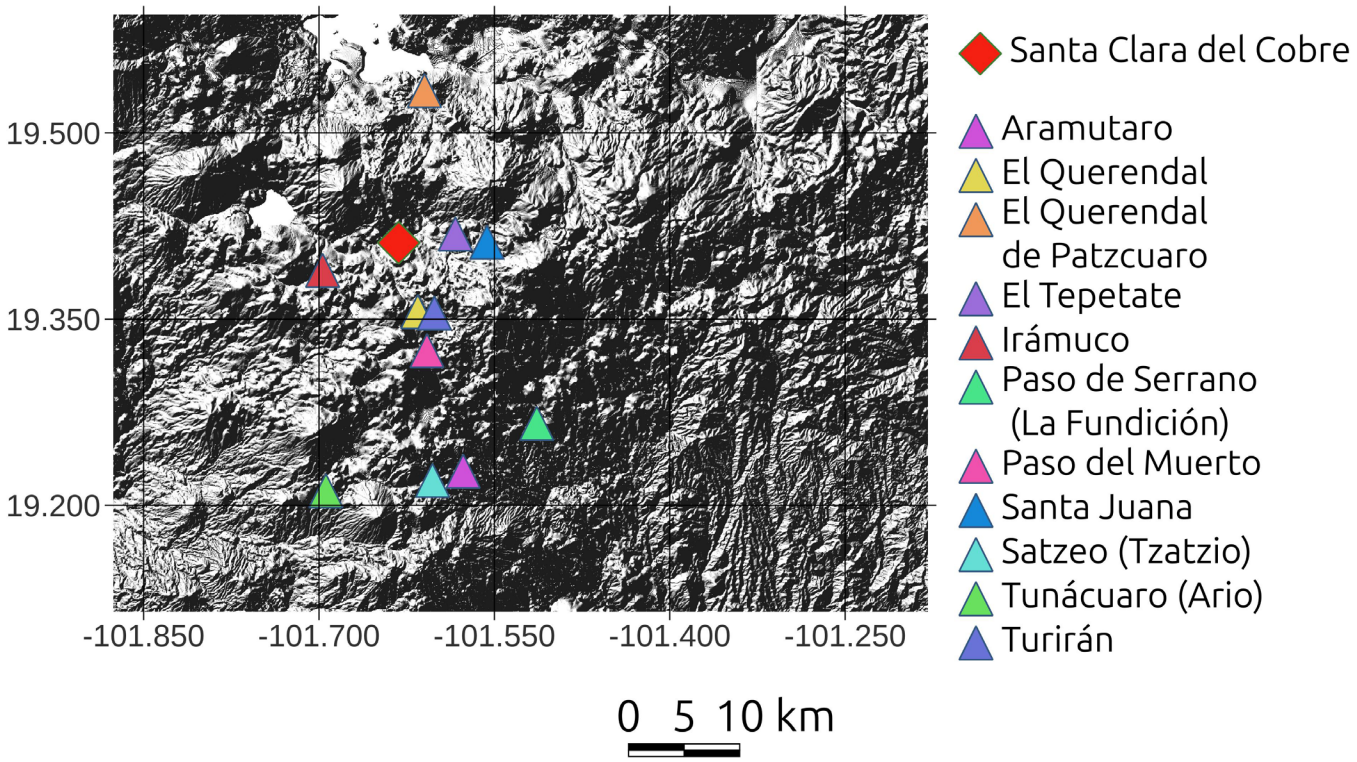

Figura 3. Principales sitios de producción y fundición de cobre en la época colonial.

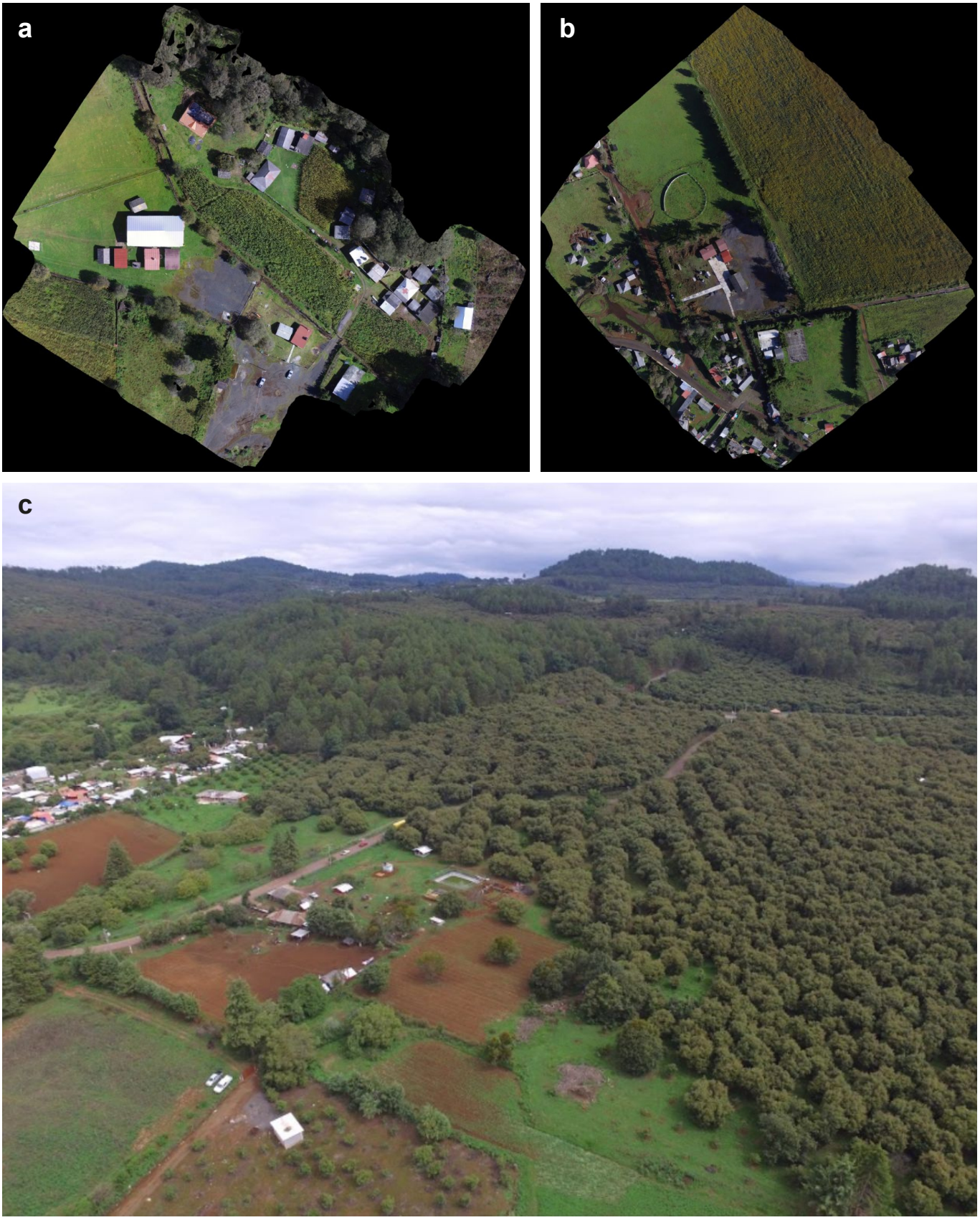

Figura 4. Querendales en el Estado de Michoacán, la escoria se reconoce por el color gris en las imágenes, en (**a**) el poblado de "El Querendal", en (**b**) el poblado de "Paso del Muerto" y en (**c**) un sitio cercano al poblado de Tzitzio en donde se puede apreciar además de huertas de frutales remanentes de bosque de pino.

través del estudio de las escorias es posible estimar las fechas de producción de estos materiales, y así conocer cómo fueron realizándose estos trabajos metalúrgicos desde la época prehispánica hasta la conquista española, lo que evidencia que esta actividad fue continua en el período mencionado (Punzo *et al.* 2015). En la **Figura 4** podemos observar las querendas en tres sitios distintos del Estado de Michoacán.

Impacto de la actividad minera y trabajo del cobre en la región occidente de México

Existe información sobre las prácticas contemporáneas de trabajo del cobre, en particular en Santa Clara del Cobre, en Michoacán. En un reporte de la FAO (1991) titulado "El papel de la biomasa como energético en la industria artesanal de Santa Clara del Cobre, Michoacán," se indica lo siguiente: "la elaboración de un cazo de 50 kg de peso demanda de medio costal de carbón (aproximadamente 20 kg) y de entre 120 y 140 kg de leña seca, que aproximadamente equivale a 0.25 m^3". En el mismo documento se menciona que parte de la madera es leña de desperdicio del aserrío en diversas industrias. Comenta que existe una relación de 50 y 50% en los consumos de leña y carbón y que al mismo tiempo consumen del 60 al 70% del desperdicio de aserrío (según reportes del servicio de Inspección y Vigilancia equivale a 60 000 m^3 anuales), así la demanda de leña como energético en la actividad cobrera sería de aproximadamente 40 000 m^3 al año (FAO 1991). Finalmente, en ese reporte se indica lo siguiente: "la actividad extractiva industrial no mantiene una relación directa con la actividad cobrera", pero a pesar de ello concluyen que hay un impacto ambiental directo por la extracción ilegal de madera. En otro estudio, Punzo (2014) documentó que las fundiciones tradicionales encontradas actualmente en Santa Clara del Cobre utilizan entre 350 y 400 kilogramos de carbón para la fundición de 200 kg de cobre.

En cuanto al impacto de la industria del cobre desde la llegada de los españoles hasta el año 1800, a partir de la evidencia indirecta y los datos encontrados en las fuentes se pueden hacer estimaciones en términos del consumo de madera y el área de bosques que fue posiblemente impactada. Para ello es necesario, en primer lugar, saber la cantidad de madera necesaria para producir una cantidad de cobre determinada. Para la región occidente de México, como ya se discutió, se conocen diversos aspectos de las técnicas de beneficio de este metal, pero no se cuenta con información sobre el consumo de madera, ya sea de fuentes históricas o a partir de experimentos que reproduzcan las técnicas antiguas.

Rose *et al.* (2020), llevaron a cabo este tipo de experimentos de beneficio de cobre a partir de calcopirita, el mismo mineral utilizado en el occidente de México, reproduciendo el método a partir de evidencias arqueológicas de la región de los Alpes. El proceso de fundición de cobre descrito en este estudio (Rose *et al.* 2020) implica varias etapas cruciales para la extracción del metal a partir del mineral de calcopirita ($CuFeS_2$). Este mineral, que contiene cobre, hierro y azufre, es uno de los principales recursos para la producción de cobre.

La primera fase del proceso es la preparación del mineral. Esto incluye el triturado y el tamizado del mineral de calcopirita para asegurar que las partículas sean lo suficientemente pequeñas para facilitar la fusión. A menudo, se realiza un pretratamiento térmico para eliminar parte del azufre y mejorar la eficiencia en el proceso de fundición (Rose *et al.* 2020). Una vez preparado, el mineral se mezcla con fundentes como sílice y carbonatos, que ayudan a formar una escoria y a disminuir la temperatura de fusión. La mezcla se coloca en un horno, donde se calienta a temperaturas que oscilan entre 1200 y 1300 grados Celsius. En esta etapa, el azufre se volatiliza, mientras que el cobre se reduce y se separa de los otros elementos.

Durante la fusión, se forman dos fases: una fase líquida que contiene el metal de cobre y otra fase sólida, la escoria, que se compone de impurezas y componentes no metálicos. La escoria, que es menos densa que el metal, flota sobre la superficie y se puede retirar fácilmente (Rose *et al.*, 2020) El proceso de fundición también puede incluir una etapa de afinación, donde el cobre metálico obtenido se purifica aún más para eliminar impurezas adicionales. Esto se logra mediante procesos electroquímicos o térmicos adicionales. Finalmente, el cobre fundido se puede depositar en moldes para obtener lingotes o se puede continuar procesando según sea necesario para aplicaciones específicas.

Asimismo, en el texto de Rose *et al.* (2020), se menciona que se utilizó estiércol como un agente reductor durante el proceso de fundición. En el caso de Latinoamérica no existía el ganado previamente a la llegada de los españoles, por esta razón el estiércol no se pudo utilizar en esa época en Mesoamérica, sin embargo, en el legajo 1204, se menciona que para la fundición se usaban tierras de la Huacana, tal vez como un fundente.

A partir de los experimentos de Rose *et al.* (2020), el consumo de madera para el proceso hasta llegar a 3.6 kg de un producto concentrado en cobre esponjoso ("spongy copper") pero aun mezclado con escoria y 46 g de cobre metálico fue de 906 kg. Cabe mencionar que,

de éstos, 689 kg se utilizaron como madera y 43.4 kg como carbón, aplicando la proporción de 5 a 1 (madera a carbón) propuesta por la FAO (1991), esta cantidad de carbón equivale a 217 kg de madera.

De las fuentes se sabe la producción reportada para diversos años entre 1528 y 1800 como se ilustra en la **Figura 2**, a partir de esta información en la **Tabla 1**, se presenta esta producción en quintales (como se encuentra reportada) y su equivalente en kilogramos considerando que un quintal corresponde a 46.025 kg, así como la madera consumida en cada año considerando la cantidad mencionada anteriormente para producir los 3.6 kg de cobre esponjoso con escoria (se ignoran los 46 gramos de cobre metálico para estos cálculos). Estos cálculos por lo tanto representan un subestimado, pues se requerirían de pasos posteriores para purificar el cobre esponjoso. Se presentan dos columnas en las que se calcularon las hectáreas y km^2 de bosque requeridas para obtener la madera utilizando solamente a *Pinus pseudostrobus* usando como aproximación los datos de Vásquez-Fabián *et al.* (2017) que obtuvieron un promedio de 43 000 kg/ha de madera de *Pinus pseudostrobus* en el estado de Oaxaca, esta es la especie de pino más común en los bosques de Michoacán. En las dos últimas columnas, se muestran las hectáreas y km^2 de bosque considerando las estimaciones de Hernández-Moreno *et al.* (2020), para bosques de la zona de la mariposa monarca en Michoacán. En la **Tabla 2**, se presentan los cálculos considerando una producción para cada año equivalente al año con menor producción más cercano.

Conclusiones

De lo anteriormente expuesto, destaca el hecho de que el área calculada, posiblemente deforestada de 1528 a 1800 no fue tan extensa como podría pensarse, el área de 116.5 km^2 representa el 0.54 % de los bosques templados del Estado de Michoacán de acuerdo al mapa

Tabla 1. Estimación de km^2 de bosque utilizados en la producción de cobre en Michoacán, a partir de la producción de cobre en quintales mencionada en la Figura 2.

Año	Cobre (quintales)	Cobre (t)	Madera (t)	Hectáreas *P. pseudostrobus*	Km^2 *P. pseudostrobus*	Hectáreas de bosque	Km^2 de bosque
1528	800	36.8	9266.4	215	2.2	28.7	0.3
1780	3000	138.1	34748.9	808	8.1	107.5	1.1
1781	4000	184.1	46331.8	1077	10.8	143.3	1.4
1782	5000	230.1	57914.8	1347	13.5	179.2	1.8
1792	10800	497.0	125096.0	2909	29.1	387	3.9
1793	7300	336.0	84555.6	1966	19.7	261.6	2.6
1800	9684	445.7	112169.4	2609	26.1	347	3.5
Totales	40584	1867.9	470082.8	10932	109.3	1454.3	14.5

Tabla 2. Estimación de km^2 de bosque para cada año equivalente al año con menor producción más cercano utilizados en la producción de cobre en Michoacán, a partir de la producción de cobre en quintales mencionada en la Figura 2.

Año	Cobre (quintales)	Cobre (t)	Madera (t)	Hectáreas *P. pseudostrobus*	Km^2 *P. pseudostrobus*	Hectáreas de bosque	Km^2 de bosque
1528	800	36.8	9266.4	215	2.2	28.7	0.3
1529-1780	800	9241.8	2325858.0	54090	540.9	7 195.7	72
1781	3000	138.1	34748.9	808	8.1	107.5	1.1
1782	4000	184.1	46331.8	1077	10.8	143.3	1.4
1782-1791	5000	2071.1	521233.1	12122	121.2	1612.6	16.1
1792	10 800	497.1	125096.0	2909	29.1	387	3.9
1793	7300	336.0	84555.6	1966	19.7	261.6	2.6
1794-1799	7300	2015.9	507333.6	11798	118	1569.6	15.7
1800	9684	445.7	112169.4	2609	26.1	347	3.5
Totales	48 684	14966.6	3766592.7	87595	876	11 653	116.5

de ecorregiones terrestres de México de la CONABIO (2008). Dos reflexiones se deben hacer cuando se considera el impacto de las actividades alrededor del trabajo con cobre en el occidente de México en el período estudiado. La primera es que, muy probablemente, la cantidad de hectáreas utilizadas para la obtención de madera para esta actividad esté subestimada, pues hay que considerar que para el cálculo se estimó la producción para los años sin datos como igual a la del año más cercano con el menor valor de producción. Sin embargo, lo más probable es que durante la época colonial se haya dado un aumento gradual en la demanda y que en algunos años se dieran picos de producción considerables como respuesta a incrementos en la demanda. Sumado a lo anterior, no hay forma de estimar la producción clandestina del metal que se dio durante todo este período. La segunda consideración es que el área de la que se extrajo la madera para la obtención del cobre en la época precolonial se encontraba cerca de los sitios de beneficio, lo que implica que el impacto a nivel local seguramente fue considerable, pero no contamos con evidencia documental sobre este particular. Al contrario de lo antes mencionado, el impacto ambiental en los bosques ocasionado en el municipio de Salvador Escalante, en las cercanías de Santa Clara del Cobre fue mayor, debido a la centralización de la producción de cobre en la zona durante la época colonial. Lo que es un hecho es que los bosques se recuperaron a tal grado que en la actualidad en muchas de las localidades con depósitos de querendas persisten bosques templados, como es el caso de Santa Clara del Cobre y Tzitzio en donde hay remanentes de bosques de pino rodeados de huertas que se establecieron en las últimas décadas.

A la escala del sitio de beneficio y trabajo con el cobre, como en Jicalán Viejo, el impacto de estas actividades persiste hasta nuestros días y se manifiesta como altas concentraciones de cobre en el suelo. Estos efectos a largo plazo están documentados para otras regiones, por ejemplo, en la región del Elba, en Italia, en donde hay sitios antiguos de trabajo de hierro, se dan dos fenómenos similares a los observados en el occidente de México, en particular Jicalán Viejo, por un lado, los sitios de fundición se pueden encontrar lejos de las minas pero cerca de las fuentes de madera, y en la actualidad se pueden detectar altas concentraciones de metales en el suelo (Becker *et al.* 2019).

Zhang *et al.* (2017), argumentan que la metalurgia y fundición de metales son de las actividades con mayores consecuencias en el medio ambiente, a pesar de ello, la historia de estos impactos es relativamente desconocida y es necesaria la evidencia arqueológica del origen de la metalurgia para conocerlos más a fondo. En este sentido, Knabb *et al.* (2016), realizaron un estudio en el Valle de Faynan, en el sur de Jordania en donde la producción agrícola y la metalurgia de cobre han coexistido por 6 000 años. Concluyen que la presencia de sitios contaminados en el valle es muy variable y que es una combinación de factores naturales y culturales. Por un lado, se pueden encontrar los sitios en donde se ha acumulado la escoria, con los riesgos asociados a la contaminación por metales pesados de estos residuos y por otro, los sitios en donde se han acumulado metales pesados movilizados por las características propias del paisaje. En el caso de los querendales en el occidente de México, es posible una situación similar que merece ser investigada.

Referencias

Alegría R (2014). *Extracción de escorias de fundición de cobre por vía Hidrometalurgia.* [Tesis de licenciatura]. Instituto Politécnico Nacional.

Becker F, Eser RA, Hoelzmann P, Schütt B (2019). The environmental impact of ancient iron mining and smelting on Elba Island, Italy – A geochemical soil survey of the Magazzini site. *Journal of Geochemical Exploration* 205:106307. doi:10.1016/j.gexplo.2019.04.009

Castro Montes DP (2019). Vestigios de fundición primaria prehispánica y colonial en la orfebrería de Santa Clara del Cobre: Un enfoque etnoarqueológico, experimental y comparativo. [Tesis de maestría, El Colegio de Michoacán.] http://colmich.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1016/676

CONABIO (2025). Ecorregiones Terrestres de México. Escala 1:1000000. México. http://geoportal.conabio.gob.mx/descargas/mapas/imagen/96/ecort08gw

DiNapoli RJ, Rieth TM, Lipo CP, Hunt TL (2020) A model-based approach to the tempo of "collapse": The case of Rapa Nui (Easter Island). *Journal of Archaeological Science* 116:105094. doi:10.1016/j.jas.2020.105094.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (1991). El Papel de la Biomasa como Energético en la Industria Artesanal de Santa Clara del Cobre, Michoacán. https://www.fao.org/4/AD096S/AD096S00.htm#TOC

Gavira M (2023). El cobre en Michoacán a fines del siglo XVIII: política minera, productores, aviadores y mercados. *Naveg@mérica. Revista electrónica editada por la Asociación Española de Americanistas* 31. doi:10.6018/nav.586071

Hernández-Moreno JA, Velázquez-Martínez A, Fierros-González AM, Gómez-Guerrero A, Reyes-Hernández VJ, Vera-Castillo JAG (2020). Estimación de biomasa aérea y carbono, en rodales con y sin manejo forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. *Madera y Bosques* 26(1):e2611802. doi:10.21829/myb.2020.2611802

Jiménez O (2017). Sobre el origen americano de los descubridores

de metales en la primera mitad del siglo XVI novohispano. *Saberes. Revista De Historia De Las Ciencias Y Las Humanidades* 1:41-73. https://www.saberesrevista.org/ojs/index.php/saberes/article/view/70

Kennett DJ, Masson M, Lope CP *et al.* (2022). Drought-Induced Civil Conflict Among the Ancient Maya. *Nature Communications* 13:3911. doi:10.1038/s41467-022-31522-x

Knabb KA, Erel Y, Tirosh O, Rittenour T, Laparidou S, Najjar M, Levy TE (2016). *Journal of Archaeological Science* 74:85-101. doi:10.1016/j.jas.2016.09.003.

Osuna-Vallejo, Ramos I, Lindig-Cisneros R, Morales J, Punzo J (2022). Patrones de la vegetación y su relación con vestigios arqueológicos asociados al beneficio de cobre en la localidad de Jicalán Viejo, Michoacán. *Trace* 81:162-180. doi:10.22134/trace.81.2022.780

Punzo J (2014). Santa Clara del Cobre. Zona de Monumentos Históricos. Instituto Nacional de Antropología e Historia.

Punzo J, Morales J, Goguitchaichvili A (2015). Evidencia de escorias de cobre prehispánicas en el área de Santa Clara del Cobre, Michoacán, Occidente de México. *Arqueología Iberoamericana* 28:46-51. doi:10.5281/zenodo.1312650

Rose T, Hanning E, Klein S (2020). Smelting Experiments with Chalcopyrite Ore based on Evidence from the Eastern Alps. *Metalla* 25:77–100. doi:10.46586/metalla.v25.2019.i2.77-100

Roskamp H (2010). God Of Metals: Tlatlauhqui Tezcatlipoca and the Sacred Symbolism of Metallurgy in Michoacan, West Mexico. *Ancient Mesoamerica* 21:69–78. doi:10.1017/S0956536110000118

Trujillo A (2013). La teoría Dempster–Shafer en la aplicación de modelos predictivos arqueológicos: El caso de la minería del cobre en Tierra Caliente, Michoacán, México. Comechingonia. *Revista de Arqueología* 17:107-127. doi:10.37603/2250.7728.v17.n2.18193

Vásquez-Fabián SA, Rodríguez-Ortiz G, Enríquez-del Valle JR, Campos-Angeles GV, Santana-Flores A (2017). Volumen y biomasa aérea de *Pinus pseudostrobus* y *P. teocote* del sur de Oaxaca. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 4:164-172.

Uribe Salas JA (1993). La explotación del cobre en la Nueva España. *Ciencia Nicolaita* 4:45-60.

Uribe Salas JA (1996). Minería del cobre en el occidente del México prehispánico: un acercamiento historiográfico. *Revista De Indias* 56:297–332. Doi:10.3989/revindias.1996.i207.807.

Zamora V (2003). El conocimiento de los metales y su beneficio por los indígenas. *Acta Universitaria* 13(1):36-48.

Zhang S, Yang Y, Storozum M, Li H, Cui Y, Dong G (2017). Copper smelting and sediment pollution in Bronze Age China: A case study in the Hexi corridor, Northwest China. *CATENA* 156:92-101. doi:10.1016/j.catena.2017.04.001.