

Las presas de jales en el noroeste del estado de Sonora: una aproximación geográfica mediante percepción remota

Tailings dams in the northwestern portion of the state of Sonora: a geographical approximation through remote sensing

Jaime Dávila Luna,* Rolando Enrique Díaz Caravantes,* Luis Alan Navarro Navarro* y Estrella Romeo Méndez*

Recibido: 02/08/2018. Aprobado: 14/05/2018. Publicado en línea: 17/08/2018.

Resumen. La minería es una de las actividades impulsoras de la economía que más contamina el medio ambiente. Los desastres por derrames en presas de jales mineros en todo el mundo así lo indican. En estas circunstancias, un reto es desarrollar esta actividad garantizando la sustentabilidad del entorno, y para ello es necesario contar con un diagnóstico real del estado de conservación y funcionamiento de estas instalaciones. Esta tarea es difícil de lograr debido a la poca supervisión de las dependencias oficiales responsables, a la falta de un catastro público confiable de estas instalaciones y a la dificultad para obtener datos del lugar por las restricciones de las compañías mineras. Con el fin de contribuir a la elaboración de un diagnóstico, en este trabajo exploratorio se propone la metodología del Índice J empleando la percepción remota para la localización preliminar de instalaciones mineras de cobre. Su aplicación en el noreste del estado de Sonora, una importante área minera donde se encuentra la mina de cobre más grande de México, permitió identificar el 100% de las minas de cobre señaladas por el Servicio Geológico Mexicano. La aplicación del Índice J en otras zonas permitiría localizar presas de jales y excavaciones mineras de cobre de una manera confiable, relativamente rápida y a bajo costo, así como la identificación de lugares adicionales con características espectrales similares, información útil para que las autoridades responsables verifiquen en campo lo que ocurre en dichos lugares.

Palabras clave: desastres mineros medioambientales, gestión integral del agua, índice de agua de diferencias normalizadas, localización de presas de jales, percepción remota.

Abstract. Water is a key driver of development, since the well-being of societies are entirely dependent on the use of this resource. Since the availability of freshwater in the world is often limited in quality and quantity, a sustainable and balanced harmonization of the multiple uses of water is a complex task, considering the varied and different types of social, economic, political and environmental interests that unavoidably compete with each other given the limited availability of the resource.

For its part, mining is one of the key drivers of the economy; on the one hand, it is a major job-creating activity which translates into regional economic development and, on the other, mining is highly predatory on the ecological environment in the territory where it operates, and regularly requires extensive environmental mitigation works.

Ore concentration methods are multiple, according to the mineral mined; those dealing with metallic mining often produce enormous amounts of pollutants, as they involve the use of high concentrations of catalysts diluted in large volumes of water. These require large containment structures during the ore refining stages and the final disposal of non-usable wastes, called Tailings Dams.

The challenge in the near future is to conduct this operation while ensuring environmental sustainability through Integrated Water Management, involving the coordinated management of all uses, demands by and needs of the different social, economic, environmental and political stakeholders. A first step would be issuing a solid diagnosis of the state of conservation and operation of mining facilities both operating and out of operation.

* El Colegio de Sonora, Calle Obregón #54, Col. Centro, 83000, Hermosillo, Sonora, México. Email: jaimedavilaluna@icloud.com

This is a complex task, given the poor supervision of government agencies in charge, the lack of a reliable public cadastre of these facilities, and the difficulty involved in gathering on-site data due to the restrictions imposed by private operating companies. The use of Remote Sensing to establish the geographic location of these mining facilities, in addition to offering advantages versus traditional methods, may be the only viable alternative for this purpose in some cases.

Aimed at the development of this diagnosis, this exploratory work developed the "J-Index" methodology that uses Remote Sensing for the preliminary location of tailings dams and currently operating and out-of-operation copper mining facilities; the primary objective is to facilitate its implementation by using current technologies that are broadly available, low-cost, quick, and easy to use; moreover, these should mitigate to some extent the constraints regarding resources, time and ease of access to the areas studied for monitoring the operation of such facilities.

The study area is located in the northwestern part of the State of Sonora. This includes the high portions of the Rio Sonora basin, a traditionally important mining area where the largest copper mine in Mexico is sited, and where the mining waste spill occurred in August 2014.

The construction and validation of the J-Index used photo interpretation of satellite images obtained from the Internet at Google Earth; the use of the Normalized Difference Water Index obtained from free images of the Sentinel-2 satellite of the European Space Agency; the list of

the major mines currently operating or projected elaborated by the Mexican Geological Service obtained free of charge through the National Platform of Transparency; the list of users of underground sources developed by the Public Register of Water Rights obtained from the National Water Commission website; and the public software for analysis of Geographic Information Systems called Quantum GIS.

Its application in the northeastern part of the State of Sonora allowed validating its effectiveness in locating all the tailings dams and open-pit excavations of the known copper mines; also identified were areas corresponding to natural dams or lagoons not previously identified, with spectral characteristics similar to those of tailings dams and/or mining excavations. This will allow a more accurate focus in the additional field evaluations by both the relevant authorities and the mining companies themselves, to determine in greater detail the operating conditions, maintenance, and preventive and corrective measures, as applicable, to ensure a correct operation.

The reapplication of this methodology in other parts of the world will allow the identification of potential mining facilities, both currently operating or out of operation, that may involve potential hazards related to operation failure and their effects on the ecosystem.

Key words: Environmental mining disasters, Integrated Water Management, Normalized Difference Water Index, location of tailings dams, remote sensing.

INTRODUCCIÓN

La industria minera en México se desarrolló durante más de 450 años sin una normativa que regulara la gran contaminación ambiental vinculada a esta actividad. Esto generó una cantidad, no cuantificable hasta este momento, de lugares que constituyen peligros potenciales de contaminación, "...[p]or ello resulta importante desarrollar estrategias para identificar sitios que representen un mayor peligro de dispersión de acidez y de elementos con potencial tóxico (EPT) hacia el ambiente, y poder concentrar los esfuerzos de evaluación de riesgo" (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006: 55).

La actividad minera en México se inició en la época de la colonia española; los primeros registros mineros datan de 1525 (Pérez Sáenz, 2005: 59), y fue hasta septiembre de 2004 cuando la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales aprobó, por primera vez en México, una norma para la adecuada disposición de presas de jales, la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2013

(Diario Oficial de la Federación, 2003: 1). De esta manera, es posible deducir que existe un número importante de instalaciones mineras, en funcionamiento y fuera de operación, de las cuales no se conocen sus condiciones ni sus potenciales afectaciones al medio ambiente.

El grado de peligrosidad potencial de contaminación ocasionado por derrames de las presas de jales (depósitos de desechos mineros con alta incidencia de fallas) depende principalmente de tres factores: la toxicidad del residuo, el volumen almacenado y su ubicación geoespacial dentro de la cuenca. Lo anterior también se conoce como "geodisponibilidad" (Corrales-Pérez y Romero, 2013: 428), los cuales eventualmente podrían ocasionar daños a los ecosistemas en el corto, mediano o largo plazo.

El empleo de la percepción remota (la caracterización de los materiales en la superficie terrestre empleando las firmas espectrales de los mismos obtenidas por medio de imágenes satelitales) para localizar la ubicación geográfica de las instalaciones

mineras, además de presentar ventajas contra los métodos tradicionales, en algunos casos puede ser la única opción viable.

El objetivo del presente trabajo es explorar una metodología para la localización preliminar de instalaciones mineras de cobre, activas y fuera de operación, por medio de la cual, al aplicar las tecnologías de percepción remota, podamos identificar estos lugares de forma fácil, rápida y económica. Asimismo, se pretende que su aplicación permita subsanar en alguna medida las limitaciones de recursos, tiempo, espacio y difícil acceso a las áreas estudiadas que existen en la supervisión del funcionamiento de dichas instalaciones. Lo anterior podría contribuir a la creación de un registro de instalaciones mineras en Sonora seguro y confiable, que pueda orientar la creación de un diagnóstico de la operación, funcionamiento y de los riesgos asociados y, eventualmente, siguiendo los pasos adecuados, poder garantizar la sustentabilidad del medio ambiente.

Por ser Sonora un estado eminentemente minero y contar con la mina de cobre más grande de México, en los antecedentes de este trabajo se describen las operaciones básicas de extracción y explotación de este mineral, y la función de las llamadas presas de jales y tanques de lixiviados dentro de sus instalaciones. Asimismo, se muestran los principales desastres medioambientales ocasionados recientemente por derrames mineros en varias partes del mundo y su repercusión en términos de remediación medioambiental. Se menciona también el desarrollo de la industria minera en el estado de Sonora y el estado que guarda la normatividad ambiental aplicable, así como los volúmenes de producción por tipo de mineral y los estudios recientes aplicados en la detección remota de minas de cobre.

En la siguiente sección se describe, a partir de la cobertura de la imagen satelital seleccionada para este trabajo, el área de estudio, su estrecha relación con la ubicación de la mina de cobre más grande de México y con el reciente derrame de contaminantes mineros en una de las principales cuencas hidrológicas de Sonora, así como las principales cuencas hidrológicas en la zona, las principales minas y sus características de producción.

Adicionalmente, se describen los recursos empleados para el análisis y desarrollo de la metodología, desde los sitios de información oficial sobre las empresas mineras, los sitios públicos de acceso a imágenes satelitales, las técnicas de interpretación y software utilizados, las características temporal y espacial de la imagen satelital examinada, las características y análisis de las firmas espectrales analizadas, y los índices espectrales empleados y propuestos.

Por último, se analizan los resultados obtenidos en términos de la efectividad del método para localizar, primero, las minas de cobre y presas de jales ya identificadas oficialmente, y de manera adicional los lugares no identificados previamente que presentan características espectrales similares a estas y que requieren de una verificación en campo.

ANTECEDENTES

La industria minera es, por una parte, una importante actividad generadora de empleos y desarrollo económico regional y, por otra, una actividad altamente nociva para el entorno que regularmente requiere de grandes obras de remediación ambiental.

La evolución de la economía a nivel mundial, con referencia a los precios de los metales y a las nuevas técnicas de explotación mineras desarrolladas en los últimos años, ha ocasionado que sea económicamente rentable la explotación de depósitos minerales de bajas concentraciones con la predominancia de la explotación a cielo abierto o a tajo abierto, aparejada con la disminución sensible de la explotación de minas subterráneas, con la consecuencia de un incremento en el volumen de desechos mineros para una misma cantidad de mineral final obtenido. Si consideramos una concentración económicamente rentable del 0.3%, se tendría que manejar un volumen de explotación de 1 667 kilogramos (kg) para obtener un volumen de mineral refinado de 5 kg de cobre, y un residuo minero contaminante de 1 662 kg (Armendáriz, 2016: 1, 5, 6, 8, 10). Una concentración típica de mineral de cobre es del 0.5%, obtienen solamente 5 kg por cada 1 000 kg de material explotado,

generando un volumen de residuo minero de 995 kg (López, 2013: 1).

Los métodos de concentración de minerales son variados, dependiendo del mineral explotado, y generalmente emplean grandes cantidades de agua la cual, mezclada con las excavaciones ricas en minerales metálicos o no metálicos, requieren de estructuras para su contención. Los métodos correspondientes a la minería metálica son frecuentemente los que generan una mayor cantidad de contaminantes, ya que requieren altas concentraciones de agentes catalizadores diluidos en agua, generalmente muy dañinos para el medio ambiente y de uso común en los procesos de concentración de minerales (López, 2013: 1).

Por lo anterior, en la minería a cielo abierto es común el empleo de grandes cantidades de agua durante los procesos de concentración de material, requiriéndose además varios tipos de instalaciones para su manejo y almacenamiento: entre estas se encuentran las de concentración, conocidas también como terreros o tanques de lixiviados; estas se construyen regularmente al aire libre, con bordos de tierra sobre el terreno natural, donde ocurre el proceso de separación de minerales. Otras son instalaciones para depósitos de mezclas de contaminantes después de emplearse en el proceso de concentración, son conocidas como presas de jales, y por lo regular son instalaciones al aire libre con bordos de tierra sobre el terreno natural, donde se acumulan los residuos líquidos y sólidos de contaminantes que fueron desechados del proceso de concentración del mineral.

La Norma Oficial Mexicana NOM-141-SE-MARNAT-2013 (Diario Oficial de la Federación, 2003: 4-7) define los siguientes conceptos al respecto:

- Jales: residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales.
- Lixiviado: líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción química, arrastre o percolación y que contiene, disueltos o en suspensión, componentes que se encuentran en los mismos residuos.

- Presa de jales: obra de ingeniería para el almacenamiento y disposición final de los jales, cuya construcción y operación ocurren simultáneamente.
- Vulnerabilidad del acuífero: conjunto de condiciones geológicas que definen la capacidad de defensa o del amortiguamiento del acuífero ante una situación de amenaza por el manejo de jales.

A pesar de que las grandes compañías mineras con operaciones internacionales regularmente se manejan con estrictos protocolos de seguridad, la alta peligrosidad de las sustancias empleadas en los procesos mineros de explotación y refinación hacen que una falla menor en el manejo de estas sustancias ocasione grandes contaminaciones ambientales, muchas veces difíciles de restituir en términos ecológicos en el corto y mediano plazo.

En todo el mundo se han documentado diversos y muy dañinos derrames en presas de jales. Entre estos se puede mencionar la falla en la presa de decantación de la mina de cobre, plomo y zinc Aznalcóllar en Sevilla, España, el 25 de abril de 1998, en la cual se derramó un volumen aproximado de 6 millones de m³ de lodos y aguas ácidas con altas concentraciones de metales en disolución al río Guadamar. Este derrame afectó 4 630 hectáreas a lo largo de 62 km de ríos, ocasionando graves daños medioambientales y socioeconómicos (Arenas, Carrero, Galache, Mediavilla, Silgado, Vázquez, 2001: 35-56).

También se presentó la falla en la presa de jales de la mina de cobre, plomo, plata y zinc Caudalosa Chica en Huancavelica, Perú, el 25 de junio del 2010, la cual derramó 57 mil m³ de líquidos contaminantes a lo largo de 7 ríos en 120 km, afectando al ecosistema de la región, así como a las actividades socioeconómicas de los pobladores directamente afectados (Pinto, 2010: 321-338).

Más recientemente, el 5 de noviembre del 2015, el rompimiento de un depósito de una mina de hierro operada por la minera brasileña Samarco derramó 70 millones de m³ de residuos tóxicos, contaminando 663 km a lo largo de los ríos Guaxo do Norte, Carmo y Doce, hasta desembocar en el mar, matando a 17 personas e inundando de

lodo y desechos a varios pueblos localizados a lo largo de los ríos mencionados (Porto, 2016: 1).

Además de los desastres ecológicos ocasionados por derrames en presas de jales, han ocurrido otros al interior de las instalaciones de las empresas mineras. El 6 de agosto del 2014 una falla en una de las piletas de lixiviados de la mina Cananea, propiedad de la empresa Buenavista del Cobre en Cananea, Sonora, México, ocasionó un derrame de 40 000 m³ de contaminantes mineros, afectando al arroyo Tinajas (17.6 km), a los ríos Bacanuchi (64 km) y Sonora (190 km), y a la presa El Molinito, la cual tenía en ese momento un almacenamiento de 15.4 millones de m³ para abastecer de agua potable a la ciudad de Hermosillo (Fideicomiso Río Sonora, 2016: 2-19).

Después de casi cuatro años de este derrame, todavía no se cuenta con información oficial sobre la magnitud de la afectación a los ecosistemas de la cuenca del río Sonora ni con un reporte detallado sobre las acciones requeridas, las realizadas hasta fecha, ni las que aún faltan para garantizar la restauración ecológica del sistema, en caso de que así se determine. Actualmente, se encuentra en proceso de elaboración un estudio sobre Avances del Diagnóstico Ambiental, elaborado por el Instituto de Ecología de la Universidad Nacional Autónoma de México, en el que se afirma que existen fuertes y claras evidencias de afectaciones a los ecosistemas de los ríos Bacanuchi y Sonora (Universidad Nacional Autónoma de México, 2016: 4). Asimismo, algunos académicos han estudiado los resultados del monitoreo de calidad del agua del Fideicomiso y, entre otras cosas, han detectado algunos sitios en donde se rebasan las regulaciones oficiales y guías mundiales de calidad del agua (Díaz-Caravantes, Duarte Tagles, Pallanez Murrieta, Moreno Vázquez, Mejía Santellanes, Durazo Gálvez, 2016: 91-96; Díaz-Caravantes, Duarte Tagles, Durazo Gálvez, 2017: 75-87).

La minería en la cuenca del río Sonora es, en términos históricos, una de las actividades económicas y sociales más importantes a nivel estatal, ya que los primeros asentamientos humanos en la región, durante la colonia, se ubicaron en esta zona, situación que fue favorecida por la disponibilidad del recurso agua (Comisión Nacional del

Agua, CIAD, 2013: 16, 80-83). Esta situación se mantiene en la actualidad, ya que la producción minera en el estado de Sonora es muy importante a nivel nacional en minerales como oro, cobre, molibdeno, grafito y wollastonita. Mención especial merece la explotación de minerales de cobre, ya que Sonora ocupó, durante 2014, el primer lugar a nivel nacional con 403 860 toneladas/año, siendo la empresa Buenavista del Cobre, filial del Grupo México, la empresa minera que reportó la mayor producción de este mineral (Servicio Geológico Mexicano, 2015: 2-4, 8-9).

Hoy en día se tiene conocimiento de que el número y volumen de desechos almacenados en estas presas de jales va en aumento y, por lo tanto, los riesgos potenciales de nuevos derrames. En un análisis multitemporal de las coberturas de suelo realizado en la cuenca del río Sonora en el periodo de 1974 a 2011, se obtuvo como resultado un incremento en las superficies totales destinadas a presas de jales de 719 hectáreas en 1974 a 2 273 en 2011, aunque el estudio no especifica si dichas presas se encuentran en operación o no (CONAGUA, 2013: 16, 80-83).

La empresa Buenavista del Cobre planea aumentar su producción con la construcción de un nuevo depósito de jales para almacenar “100,000 toneladas diarias de molienda de geomaterial natural”, el cual “ocupará una superficie aproximada de 4,000 hectáreas y tendrá una altura máxima de 200 metros, que se alcanzarán en 40 años” de operación (Orozco y Muhech, 2012: 1).

Ubicar, cuantificar, caracterizar y evaluar los peligros de los residuos de las operaciones mineras, y de los peligros potenciales de derrames accidentales de presas de jales y piletas de lixiviados en operación y abandonadas, puede ser una tarea muy compleja y costosa, ya que la única información disponible públicamente sobre el desarrollo de esta industria es la manifestación de impacto ambiental de cada proyecto minero, por lo que hacer un condensado de la información para el estado requeriría de mucho tiempo y trabajo. Otro problema para la recolección y verificación de datos de campo es el limitado o nulo acceso a las instalaciones mineras en desarrollo, generalmente por políticas de las empresas privadas que las operan.

Además, en México son poco conocidos los estudios destinados a evaluar estos peligros potenciales. Otras investigaciones ya fueron llevadas a cabo en algunas zonas mineras del país (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006: 55-56), pero estas se orientaron a las características especiales de explotación de cada zona, que no son necesariamente iguales a las características generales de la zona del río Sonora. En dichos trabajos se emplearon imágenes de satélite y ortofotos, junto con cartas topográficas y geológicas solamente para ubicar los sitios de las presas de jales y estimar la profundidad promedio para cálculo de volúmenes. El empleo de imágenes satelitales regularmente es aplicado a la exploración de yacimientos minerales (Mendivil-Quijada, 2012: 9-20).

Hace algunos años, el empleo de la percepción remota en el modelado del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, conocido como NDVI por sus siglas en inglés, permitió localizar e identificar las presas de jales de minas de cobre en operación en el estado de Arizona, en los Estados Unidos de América (Shimmer, 2008: 1-10).

El empleo de la percepción remota para la identificación de depósitos superficiales de líquidos presenta grandes ventajas con respecto a los métodos tradicionales, porque se tiene información confiable a bajo costo, que abarca grandes extensiones de terreno, con un registro de observaciones de varios años y con una alta tasa de repeticiones en las observaciones.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se muestra en la Figura 1 y corresponde a la superficie del estado de Sonora que cubre una imagen del satélite SENTINEL-2¹, obtenida desde la página de internet de la Agencia Espacial Europea (https://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/SENTINEL_2). Esta imagen satelital, en su formato original, cubre

la parte noroeste del estado de Sonora (70% del área total de la imagen) y la parte sur del estado de Arizona en los Estados Unidos de América (30% del área total de la imagen). Debido a que este estudio se enfoca en el estado de Sonora, se tomó en cuenta solamente el área que lo cubre (8 470 km² aproximadamente), colindando en su parte norte con la línea divisoria internacional México-EE.UU.

Esta zona incluye, total o parcialmente, los municipios de Santa Cruz, Cananea, Nogales, Naco, Ímuris, Cucurpe, Arizpe, Bacoachi y Fronteras; contempla la parte alta de la cuenca del río Sonora, que fue donde se originó el derrame de contaminantes mineros en agosto del 2014, así como porciones de las cuencas Río Yaqui, Río Concepción-Arroyo Cocóspera y Desierto de Altar-Río Bámori.

En esta área se localizan las principales minas de cobre activas en Sonora, entre las que se encuentra la mina de cobre más grande de México, Cananea (empresa Minera Buenavista del Cobre, filial del Grupo México), en la cual ocurrió el derrame anteriormente citado, razón por la cual se seleccionó la imagen de SENTINEL-2, considerando también la conveniencia metodológica de emplear una sola imagen satelital.

En esta área también se encuentran las minas de cobre Puertecitos (mina en exploración, empresa Paget Resources Corp.), María (empresa Minera María, S.A. de C.V. y Milpillars (mina subterránea, empresa Minera La Pareña, S.A. de C.V.).

Otras minas existentes en el área de estudio son: la mina de bórax El Álamo (exploración avanzada, empresa Materiales Primas Magdalena, S.A. de C.V.), la mina de cobre y oro, El Pilar (exploración avanzada, empresa Santa Fe Gold Corp.), la mina de oro Amelia (exploración avanzada, empresa Firts Silver Reserve, S.A. de C.V.), la mina de oro y plata Bacoachi (empresa Minera La Escuadra, S.A. de C.V.) y la mina de cal hidratada Sonocal (empresa Sonocal, S.A. de C.V.).

MATERIALES Y MÉTODOS

Recientemente, la Agencia Espacial Europea (European Space Agency, ESA) comenzó la opera-

¹ Identificación de la Fotografía satelital SENTINEL-2 según la Agencia Espacial Europea: "S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160620T011107_R041_V20160619T181357_20160619T181357"

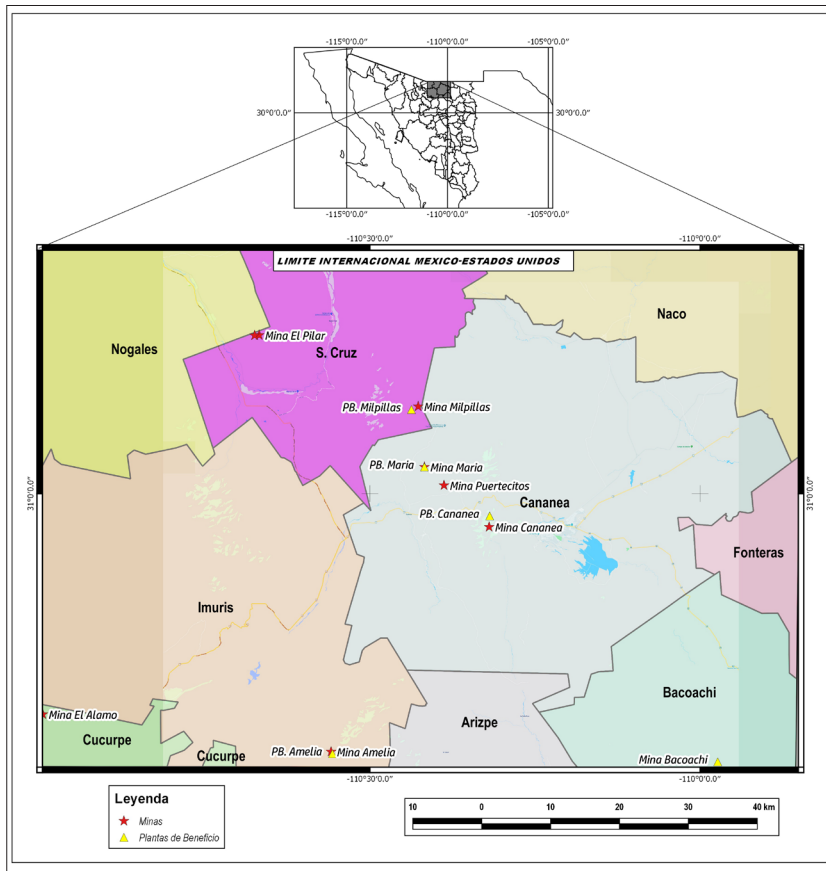


Figura 1. Área de estudio (cuadrante el límite de la imagen satelital). Fuente: elaboración propia con información del Servicio Geológico Mexicano.

ción de varios satélites denominados SENTINEL, los cuales destacan por su alta resolución espacial, además de ser gratuitos para el público y tener cobertura mundial, (European Space Agency-España, 2017: 1).

El manejo de imágenes satelitales con el empleo de programas especializados, gratuitos y comerciales, conocidos como Sistemas de Procesamiento de Imágenes, permite obtener diversos índices o indicadores que representan condiciones específicas de la superficie terrestre, y que ayudan a resaltar algunas características de interés.

Un indicador que se ha empleado satisfactoriamente en diferentes países para el mapeo de depósitos superficiales de líquidos es el Índice de Agua de Diferencia Normalizado (Normalized Difference Water Index, NDWI), el cual se calcula con la combinación de varias bandas espectrales: verde, infrarrojo cercano, e infrarrojo de onda corta

(Wenbo, Zhiqiang, Feng, Dongbo, Hailei *et al.*, 2013: 5530-5533).

La aplicación de estas técnicas de investigación en el modelado de la imagen satelital aplicadas a la cuenca del río Sonora, junto con otras fuentes de información como el Registro Público de Derechos de Agua (REPD), elaborado y administrado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), y el listado de las principales minas en explotación y exploración realizado por el Servicio Geológico Mexicano (SGM), permitieron conocer más detalladamente las condiciones actuales de las instalaciones mineras en la región.

En la Figura 2 se ilustra la secuencia del análisis realizado con el software especializado de análisis de sistemas de información geográfica de acceso libre a todo público, denominado Quantum GIS (Qgis Development team 2009. QGIS Geographic information System. Open Source Geospatial

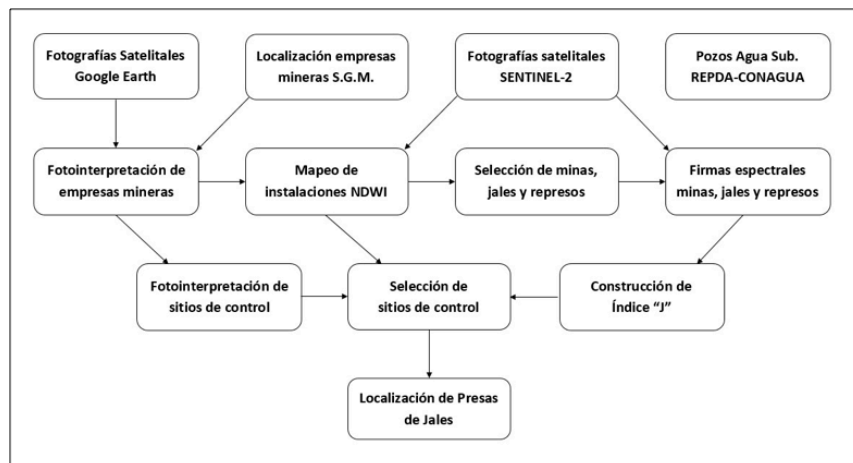


Figura 2. Esquema del diagrama de flujo de las etapas de análisis.

Foundation), obtenido de su página de internet (<https://qgis.org/es/site/>). Las etapas de este análisis se describen a continuación.

Fotografías satelitales Google Earth

La principal fuente de información para el acceso a las fotografías satelitales es Google Earth, un programa informático gratuito, desarrollado inicialmente por la compañía Keyhole, Inc., con financiamiento de la Agencia Central de Inteligencia de los Estados Unidos (Central Intelligence Agency), comprado en el año 2004 por la compañía Google y obtenido desde su página de internet (<https://www.google.com/intl/es/earth/>).

Google Earth muestra fotografías satelitales de todo el mundo en muy alta resolución y permite, además de conocer virtualmente lugares y países, analizar sitios de interés empleando la fotointerpretación, que consiste en un conjunto de criterios y técnicas que incluyen detectar, reconocer e identificar, analizar, deducir, clasificar e idealizar; además contribuye a identificar lugares considerando sus características como color, forma, tamaño, patrones, tonalidades, posición, sombras y asociaciones.

En este estudio, las imágenes de Google Earth permitieron aplicar la técnica de la fotointerpretación tanto en las instalaciones mineras conocidas, como en todos los sitios de interés: las principales localidades urbanas y rurales, diferentes tipos de caminos y vías de comunicación, depósitos de líquidos conformados naturalmente en el terreno o

construidos específicamente como almacenamientos, instalaciones agrícolas, entre otros.

Servicio Geológico Mexicano

La información obtenida del Servicio Geológico Mexicano fue gestionada a través de la página de internet del Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información y Protección de Datos Personales (INAI, <http://inicio.ifai.org.mx/SitePages/ifai.aspx>), en enero del 2017, solicitando la localización y características de las minas en el estado de Sonora; la información arrojó que las principales minas de explotación activas se encuentran en la zona noroeste de dicha entidad con intersección al área de estudio, teniéndose registradas 9 minas activas y en exploración como se muestra en la Figura 1.

Es importante mencionar que, de acuerdo con la información recibida, las únicas presas de jales en la zona corresponden a minas de explotación de cobre, y que no se incluye en dicho reporte un listado de la localización de las presas de jales de minas fuera de operación.

Registro Público de Derechos de Agua

De noviembre de 2016 a febrero de 2017 se obtuvieron, desde la página de internet de la Conagua (<http://app.conagua.gob.mx/Repda.aspx>), los listados de los aprovechamientos subterráneos en la zona centro y noreste el estado de Sonora, con el fin de verificar la cantidad, volumen de extrac-

ción y concesionarios de los pozos subterráneos clasificados como industriales, entre los que se encuentran los correspondientes a la extracción de minerales. Con esta información se trató de deducir la localización y tamaño de las principales empresas mineras en Sonora.

En los resultados obtenidos se observó una falta de correspondencia espacial entre los concesionarios de pozos subterráneos y las empresas mineras indicadas por el Servicio Geológico Mexicano, por lo que se decidió no emplear esta información en el presente estudio. La mina Cananea, de la empresa Buenavista del Cobre, tiene registrados pozos de explotación de agua subterránea como de uso industrial y diferentes usos, por lo que se duda si el volumen importante de explotación registrado como de diferentes usos se emplea total o parcialmente en actividades de minería; además, es una práctica habitual que adicionalmente a los pozos en explotación adscritos a las empresas mineras, estas tienen acceso a otros pozos de ejidos cercanos mediante acuerdos privados vigentes, lo cual no queda registrado en el REPDA.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los aprovechamientos subterráneos de acuerdo con la Conagua, observando que la mina Puertecitos en exploración (Pagenet Resources Corp) y la mina Milpillas de explotación subterránea (Compañía Minera La Pareña, S.A. de C.V.) no cuentan con pozos subterráneos concesionados, presumiblemente por no requerirse volúmenes importantes de agua en etapa de exploración (mina Puertecitos), y por aprovechar el fácil acceso a los volúmenes de los mantos freáticos como abastecimiento de agua en la mina de explotación subterránea (mina Milpillas).

Fotointerpretación de sitios

En cada sitio identificado como de actividades mineras por el Servicio Geológico Mexicano, se empleó la fotointerpretación de las imágenes satelitales de Google Earth, verificando las características de las excavaciones mineras a cielo abierto, de las excavaciones subterráneas y de las presas de jales, en conjunto con el entorno físico de dichas instalaciones y la cercanía a localidades rurales y urbanas.

Tabla 1. Concentrado de Aprovechamientos subterráneos de las principales empresas mineras en la parte alta de la cuenca del río Sonora.

MINA	EMPRESA	USO	Acuífero homologado	Volumen (m ³ /año)
Cananea	Buenavista del Cobre S.A. de C.V.	Diferentes usos	2616 – Río San Pedro	2 681 250.00
Cananea	Buenavista del Cobre S.A. de C.V.	Industrial	2627 - Río Bacoachi	6 960 713.00
Cananea	Buenavista del Cobre S.A. de C.V.	Industrial	2628 - Río Bacanuchi	6 544 519.80
Cananea	Buenavista del Cobre S.A. de C.V.	Industrial	2660 - Cuitaca	1 373 336.00
			Suma=	17 559 818.80
Maria	Minera María S.A de C.V.	Industrial	2616 - Río San Pedro	126 144.00
Maria	Minera María S.A de C.V.	Industrial	2660 - Cuitaca	680 000.00
Maria	Minera María S.A de C.V.	Industrial	2614 - Cocospera	820 000.00
			Suma=	1 626 144.00
Puertecitos	Paget Resouces Corp.			0.00
			Suma=	0.00
Milpillas	Cia. Minera La Pareña, S.A. de C.V.			0
			Suma=	0

Fuente: elaboración propia con datos del REPDA-CONAGUA.

Fotografías satelitales SENTINEL-2

Para el análisis de las firmas espectrales de las instalaciones mineras, tanto de las excavaciones a cielo abierto como el de las presas de jales en el área de estudio, se empleó la imagen del satélite SENTINEL-2 de fecha 19 de junio del 2016, con una nubosidad del 0.01%, a Nivel-1C (Ortho rectificada, valores de reflectancia y a nivel de la capa superior de la atmósfera) en proyección UTM/WGS84 (Universal Transversal de Mercator). Esta fotografía fue corregida atmosféricamente por el método de Sustracción de Pixeles Oscuros (DOS-1), también conocido como Método de Chavez (Chavez, 1996: 1025-1036).

Se eligió la fecha del 19 de junio del 2016 de la fotografía satelital de SENTINEL-2, antes del periodo de lluvias en la región. En la Figura 3 se indica el régimen de lluvias registrado en la estación pluviométrica Cananea, administrada por Conagua.

De las 13 bandas con que cuenta el satélite SENTINEL-2 y cuyas características se indican en la Tabla 2, se tomaron para el análisis de las firmas

espectrales todas las correspondientes a una resolución espacial de 10 metros (Bandas 2, 3, 4 y 8).

NWDI

Una vez definidas las bandas para el análisis, se verificó la información obtenida por el Servicio Geológico Mexicano, con el empleo del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), el cual nos permite mapear la localización de las instalaciones mineras, ya que este índice, en sus valores negativos y cero, identifica superficies de suelos desnudos, áreas rocosas sin vegetación y cuerpos de agua.

El cálculo del índice anterior se realiza utilizando las bandas del satélite SENTINEL-2, en el que la banda 3 corresponde a la banda verde del espectro visible y la banda 8 corresponde a la banda del infrarrojo cercano:

Firmas espectrales minas, jales y represos

Adicionalmente, se seleccionaron 11 diferentes áreas clasificadas en tres grupos: 1) excavaciones

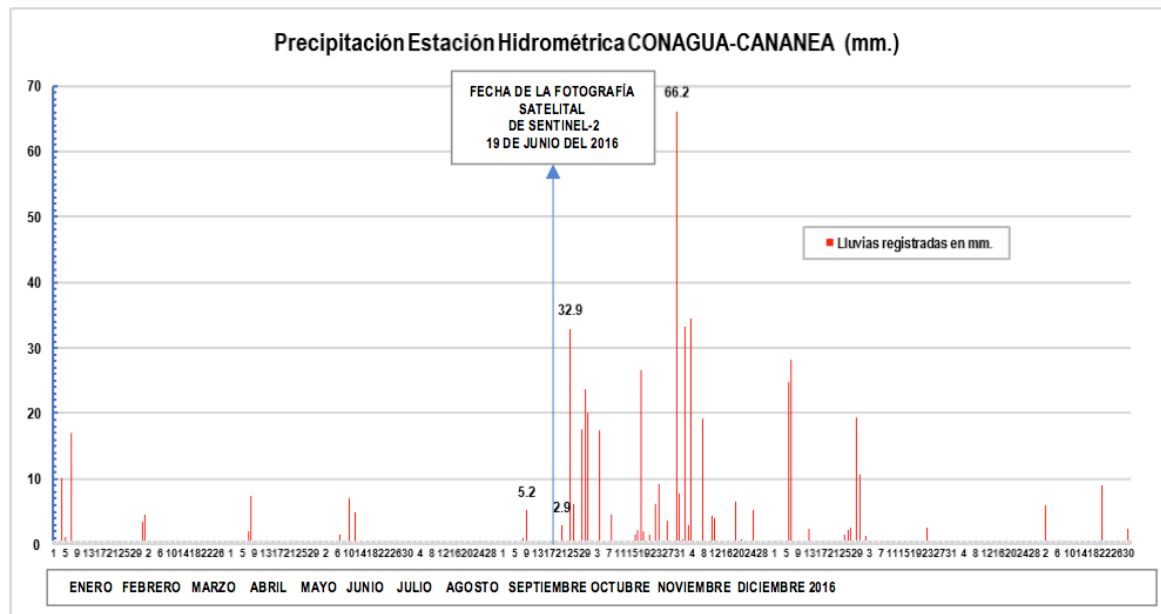


Figura 3. Periodo de lluvias en el año del 2016 registradas en la estación pluviométrica Cananea. Fuente: elaboración propia con datos de Conagua.

Tabla 2. Resolución espacial y espectral de cada una de las 13 bandas del satélite SENTINEL-2. Fuente: León (2015,: 1-21).

Bandas	Resolución espacial (m)	Resolución espectral (nm)
Banda 1 (aerosol)	60	443
Banda 2 (azul)	10	490
Banda 3 (verde)	10	560
Banda 4 (rojo)	10	665
Banda 5 (infrarrojo cercano-NIR)	20	705
Banda 6 (infrarrojo cercano-NIR)	20	740
Banda 7 (infrarrojo cercano-NIR)	20	783
Banda 8 (infrarrojo cercano-NIR)	10	842
Banda 8a (infrarrojo cercano-NIR)	20	865
Banda 9 (vapor de agua)	60	9945
Banda 10 (cirrus)	60	1375
Banda 11 (infrarrojo lejano-SWIR)	20	1610
Banda 12 (infrarrojo lejano-SWIR)	20	2190

de minas de cobre, 2) presas de jales de minas de cobre, y 3) represos o embalses naturales. Estas áreas fueron definidas previamente mediante la fotointerpretación de imágenes satelitales de Google Earth y con la información de localización de minas del Servicio Geológico Mexicano.

Para cada área se seleccionaron 5 puntos, distribuidos dentro del polígono circunscrito en el área

analizada. Los resultados del análisis promedio de cada grupo mencionado se indican en la Figura 4, pudiéndose observar para el grupo Presas de jales, una diferencia significativa en los valores de la banda 2 azul y la banda 4 rojo de SENTINEL-2. El grupo Minas sigue un comportamiento similar al anterior, separándose ambos grupos mencionados con el comportamiento del grupo Represos.

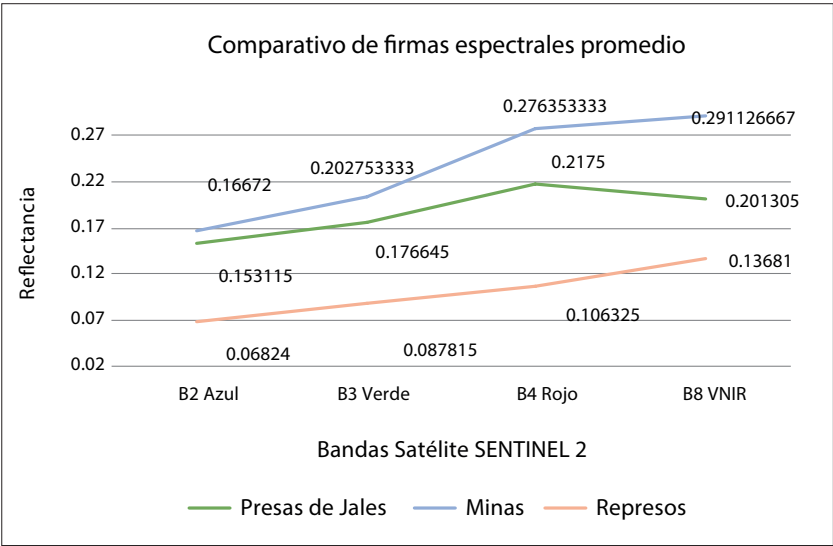


Figura 4. Curvas promedio de Firmas Espectrales, banda 2 (azul), banda 3 (verde), banda 4 (rojo) y banda 8 (visible infrarrojo cercano - VNIR) de SENTINEL-2. Fuente: elaboración propia, con datos del satélite SENTINEL-2.

Construcción del Índice J

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en el análisis de firmas espectrales, se propone un índice de localización de excavaciones mineras y presas de jales al que denominaremos Índice J, el cual contempla las diferencias en las reflectancias observadas de las bandas 4 y 2 de SENTINEL-2 de acuerdo con lo siguiente:

Para complementar la fórmula se decidió sumar la banda 2 a la diferencia normalizada, como una forma de garantizar una mejor distinción entre las clases de banda ya que, como se aprecia en la Figura

4, las presas de jales y minas tienen un valor mayor que los represos en dicha banda. El agregar esta banda permitiría una discriminación de la firma espectral de presas de jales y minas con respecto a los represos.

RESULTADOS

Mapeo de instalaciones: NDWI

En la Figura 5 se muestra el resultado del mapeo de las instalaciones mineras en la zona para valores

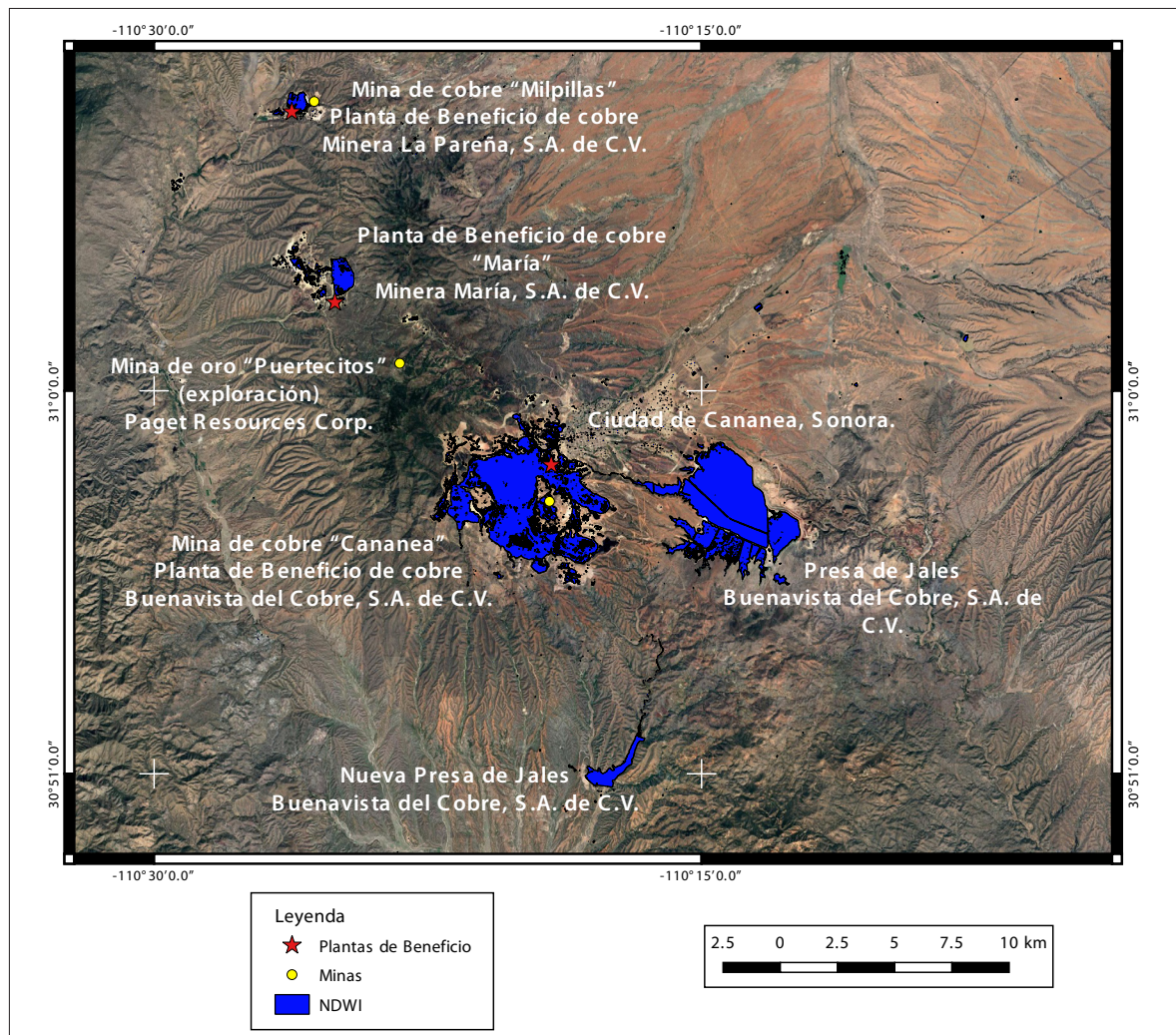


Figura 5.- Fotointerpretación y mapeo de los sitios mineros en la región de Cananea, empleando el Índice del Agua de Diferencias Normalizado. Fuente: elaboración propia, NDWI, imágenes del satélite SENTINEL-2.

de NDWI mayores a -0.2. La selección del límite inferior de -0.2 se basó en la geovisualización (exploración, análisis, síntesis y presentación de datos geoespaciales) de este límite, en el cual se pueden identificar, con una buena definición, las principales instalaciones mineras de la zona.

En esta imagen se pueden observar cuatro instalaciones mineras delimitadas por el NDWI mayor a -0.2: Minera María, la actual presa de jales de Buenavista del Cobre y la zona de excavación de esta misma minera la cual, aunque no es un cuerpo de agua, tiene un componente de humedad provocado por lluvias y escurrimientos que se acumulan en el fondo de las excavaciones, y también porque en esta área se encuentran instalaciones de refinamiento del mineral que contienen material de excavación con alto contenido de humedad como los tanques de lixiviados y espesadores de lodos, entre otros. Además, el empleo de este índice hizo posible la localización de la nueva presa de jales de la empresa Buenavista del Cobre, la cual no figura en los registros oficiales públicos.

Aunque el NDWI proporciona un buen acercamiento para delimitar las minas y presas de jales,

este no discrimina otros cuerpos de agua, como pueden ser los embalses naturales o represas de la región; para realizar este filtro se utilizó el Índice J.

Localización de instalaciones: Índice J

Se analizó el Índice J en todo el rango de variación considerado factible de aplicar, el cual incluye valores de -0.50 a 0.35 para el caso de la imagen estudiada, determinándose que en el rango de 0.21 a 0.22 se logró detectar las áreas de minas y presas de jales ya conocidas. De tal forma que se dejaron como posibles áreas mineras y presas de jales aquellos cuerpos de agua con un $NDWI \geq -0.2$, y aquellos en donde también existiera una presencia de polígonos obtenidos con el Índice J (0.21-0.22), con al menos dos píxeles continuos.

Para evaluar los resultados se seleccionaron 35 áreas detectadas con el NDWI que tuvieran características identificadas por fotointerpretación, mismas que se enlistan en la Tabla 3 y cuya localización se indica en la Figura 6.

Como se observa en la Tabla 3, 17 de los 35 lugares seleccionados tienen presencia de polígonos en el rango del Índice J (valores entre 0.21 y 0.22), es decir, son lugares con características espectrales

Tabla 3. Listado de los 35 sitios de control para la evaluación del Índice J.

No.	Nombre	Descripción	Detectado Índice J	Coordenadas geográficas	
				X	Y
1	Alberca Nogales Mx	Alberca en la Unidad Deportiva de Nogales, Sonora		-110.9529	31.2962
2	Represo Nogales Mx	Represo COLOSIO en Nogales, Sonora	*	-110.9738	31.2789
3	Represo CIBUTA	Represo de aguas pluviales cercano a Cíbuta		-110.9094	31.0457
4	Mina Magdalena	Mina de bórax Magdalena (exp. avanzada)		-110.9952	30.7130
5	Mina Pilar	Mina de oro Pilar (exploración)		-110.6748	31.2053
6	Mina El Pilar	Mina de cobre El Pilar (exp. avanzada)		-110.6679	31.2057
7	Misión Sra. del Pilar	excavaciones aleatorias y depósitos vertido libre		-110.6151	30.9267
8	Laguna Sra. del Pilar	Laguna aguas abajo de excavaciones Sra. del Pilar	*	-110.7051	30.8143
9	Mina Amelia	Mina Oro(exploración) - Planta de Beneficio (inactiva)		-110.5588	30.6629

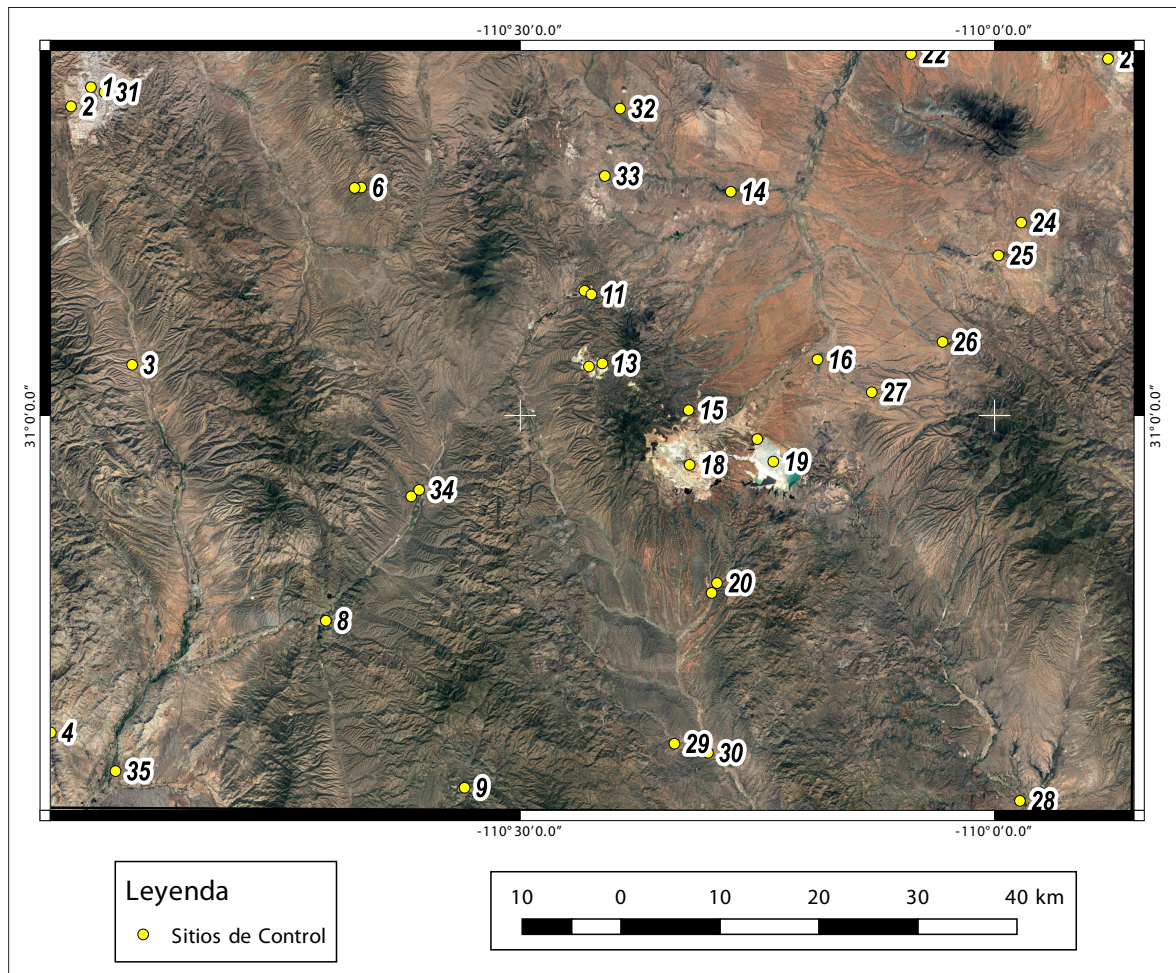


Figura 6. Localización de los 35 sitios de control para la evaluación del Índice J. Fuente: elaboración propia, empleando fotointerpretación de imágenes de satélite de Google Earth.

similares a las correspondientes a excavaciones mineras o presas de jales. Estos resultados indican una alta tasa de aciertos, ya que el 100% de las presas de jales y excavaciones de las minas de cobre señaladas por el Servicio Geológico Mexicano en la zona, que son siete, fueron identificadas con el método propuesto (No. 10, 11, 12, 13, 18, 19 y 20 de la Tabla 3).

Por otra parte, el Índice J también identificó cuerpos de agua determinados anteriormente como lagunas naturales o repesos no conocidos, con características espectrales similares a presas de jales o excavaciones mineras (números 8, 26, 27, 32 y 33 de la Tabla 3). En estos lugares se requiere realizar

los estudios de campo necesarios para la evaluación de las condiciones particulares de estos cuerpos de agua y de las áreas circundantes (en especial del influente asociado al depósito de agua), con el fin de verificar la ausencia de sustancias similares a las de las presas de jales o excavaciones mineras.

Una de las áreas mencionadas anteriormente es la denominada Laguna de la Señora del Pilar (no. 8 en la Tabla 3), en la cual se identificó, a través de la fotointerpretación de las fotografías satelitales, que posiblemente sea alimentada por derrames pluviales o mineros de una excavación tipo artesanal localizada en un lugar identificado como Misión de Nuestra Señora del Pilar, ubicada

Tabla 3. Continúa.

10	Jale Mina Milpillas	Presa de Jales de Mina de cobre Milpillas	*	-110.4324	31.1125
11	Mina Milpillas	Mina subterránea de cobre Milpillas	*	-110.4251	31.1092
12	Mina María	Mina de cobre María	*	-110.4277	31.0442
13	Jale Mina María	Jale Mina María	*	-110.4136	31.0470
14	represo no identificado	represo cercano a poblado José Ma. Morelos	*	-110.2781	31.2019
15	Represo Mina BVC	Represo pluvial aguas arriba de Mina BVC		-110.3225	31.0048
16	Represo Patos	Represo Patos cercano a Cananea		-110.1866	31.0505
17	Laguna Cd. Cananea	Laguna Pluvial adyacente a Ciudad Cananea		-110.2502	30.9786
18	Tajo mina BVC	Excavaciones en Tajo mina Buenavista del Cobre	*	-110.3215	30.9553
19	Jale mina BVC	Presa de Jales mina Buenavista del Cobre	*	-110.2332	30.9583
20	New Jale BVC	Nueva Presa de Jales de mina Buenavista del Cobre	*	-110.2927	30.8484
21	Abajo New Jale	Abajo de la cortina de Nueva Presa de Jale BVC		-110.2984	30.8394
22	Represo Border	Represo cercano a línea internacional		-110.0880	31.3260
23	SonoCal Naco	Planta de Beneficio de cal SonoCal Naco		-109.8803	31.3216
24	Espuela Naco	Espuela de Ferrocarril Naco		-109.9718	31.1741
25	Represo Espuela	Represo aguas abajo de Espuela FF.CC. Naco		-109.9959	31.1445
26	Represo no identificado	Represo no identificado cercano a pob. I. Zaragoza	*	-110.0548	31.0664
27	Represo no identificado	Represo no identificado cercano a pob. E. Zapata	*	-110.1295	31.0209
28	Mina Bacoachi	Planta de Beneficio oro y plata Bacoachi		-109.9732	30.6510
29	Laguna no identificada	Laguna no identificada		-110.3376	30.7029
30	Laguna no identificada	Laguna no identificada		-110.3022	30.6946
31	Ley Nogales	Súper Mayoreo Ley en Nogales, Sonora	*	-110.9386	31.2917
32	represo no identificado	Represo cercano a línea internacional	*	-110.3948	31.2769
33	represo no identificado	Represo sin instalaciones cercanas conocidas	*	-110.4109	31.2161
34	Área agrícola	Área agrícola en Rancho San Rafael	*	-110.6067	30.9326
35	Área agrícola	Invernaderos agrícolas al sur de la ciudad de Magdalena	*	-110.9269	30.6780

Fuente: elaboración propia, imágenes satelitales Google Earth, análisis Qgis.

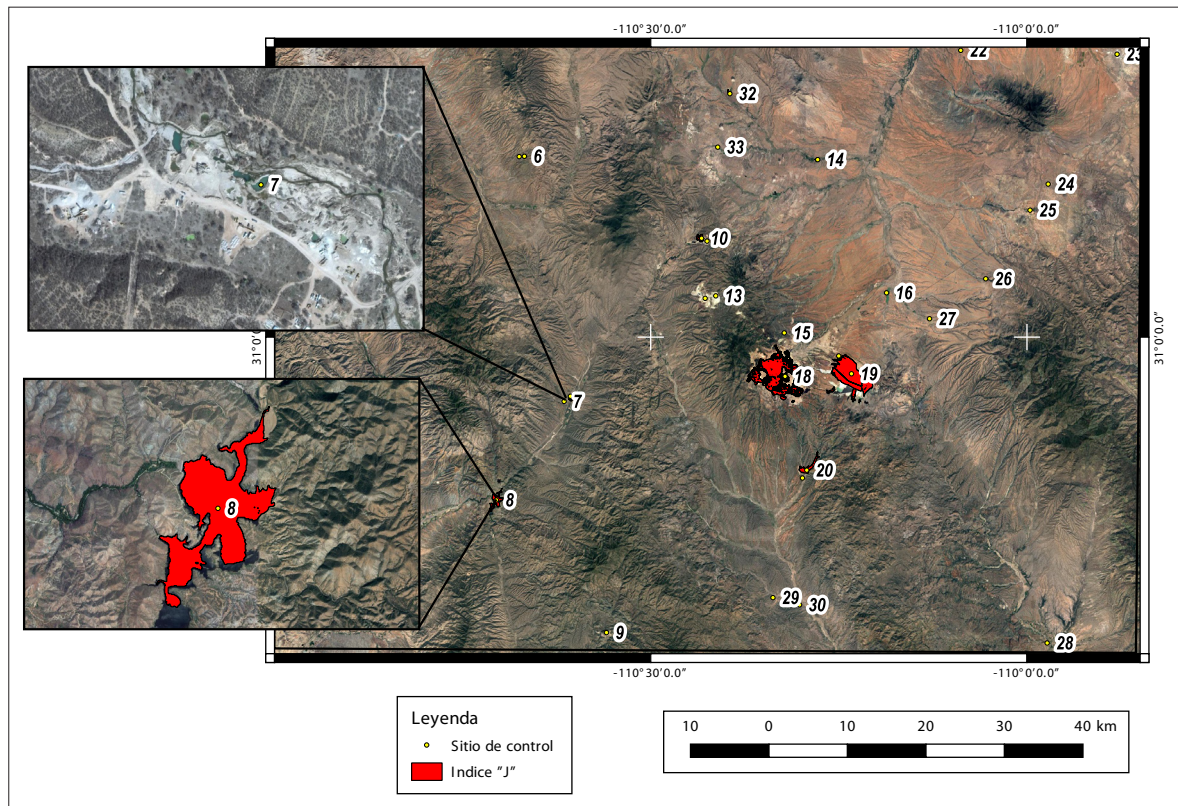


Figura 7. Localización de depósitos naturales con características espectrales similares a las presas de jales combinando los índices NDWI y el Índice J.

aproximadamente a 15 kilómetros aguas arriba de la citada laguna.

También este índice señaló cuatro lugares que, con los resultados de fotointerpretación, se determinó que no corresponden a instalaciones mineras, estos están identificados con los números 2 y 31 de la Tabla 3 y son instalaciones dentro de la mancha urbana de la ciudad de Nogales, mientras los números 34 y 35 de la Tabla 3 corresponden a instalaciones agrícolas. En estos sitios sería importante revisar las características fisicoquímicas del agua que pueden causar una señal espectral similar a las instalaciones mineras.

En resumen, la aplicación del Índice J permite: a) corroborar sitios ya señalados como excavaciones de minas de cobre y presas de jales de minas de cobre (7 áreas); b) guiar visitas de campo para investigar lo que ocurre con la calidad del agua en áreas que se supone son embalses naturales o

represos (6 áreas), y c) sugerir estudios de calidad del agua en áreas cuya localización corresponde a zonas dentro de la mancha urbana de localidades y a zonas agrícolas (4 áreas).

Ya que el Índice J fue formulado para detectar instalaciones mineras de cobre, este no identificó las plantas de beneficio de minerales metálicos de oro y plata de la mina Bacoachi (mina activa, con una producción de 2 ton/día), ni la planta de beneficio de minerales no metálicos Sonocal (mina activa, cuya producción es de 700 ton/año), posiblemente por las características de refinamiento del mineral o por el volumen reducido de producción.

De igual manera, según lo esperado, el Índice J tampoco identificó las minas que actualmente se encuentran en etapa de exploración como la mina Amelia (mina de oro), la mina El Álamo (mina de bórax) y la mina El Pilar (mina de cobre y oro), posiblemente porque las minas de oro no

requieren de presas de jales en sus procesos o por el volumen reducido de excavación cuando las minas se encuentran en etapa de exploración, comparado con la etapa de máxima producción.

CONCLUSIONES

El derrame de contaminantes ocurrido el 6 de agosto de 2014 por la empresa minera Buenavista del Cobre afectó al arroyo Tinajas, y a los ríos Bacanuchi y Sonora, por lo que ha sido considerado como el peor desastre ambiental ocurrido en la industria minera del país, de acuerdo con el secretario de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (Díaz-Caravantes, Duarte Tagles, Durazo Gálvez, 2016: 91-96). Este acontecimiento ha puesto de manifiesto la vulnerabilidad que existe ante estas situaciones, y lo poco preparados que están autoridades y población en general para prevenir, contener y remediar los efectos nocivos para el ecosistema.

Este trabajo muestra una metodología para la ubicación espacial de presas de jales en las regiones mineras, contribuyendo a reducir los vacíos de investigación en la región del río Sonora y, en general, en todo la entidad. La aplicación de este tipo de herramientas permitirá: 1) conocer cómo está evolucionando la industria minera en esta parte del país, 2) identificar el número de presas de jales y de las instalaciones para la concentración de minerales, y 3) apoyar en la evaluación de su funcionamiento, tratando de identificar cuáles de ellas pudieran estar sujetas a peligros potenciales de derrames no controlados.

La metodología propuesta en este estudio demuestra la validez del empleo de la Percepción Remota, NDWI y el Índice J para la localización preliminar de las zonas cuyas firmas espectrales presenten características similares a las de las presas de jales; replicar esta metodología en todo el territorio del estado de Sonora permitiría la identificación de posibles instalaciones mineras, fuera de operación y activas, que puedan presentar peligros potenciales de fallas y de afectaciones al ecosistema.

El presente estudio exploratorio apunta a orientar, de una manera más precisa, evaluaciones

adicionales por parte de las autoridades responsables y de las empresas mineras, para conocer con el detalle requerido las condiciones de operación y mantenimiento de las instalaciones mineras, y las probables acciones de prevención y corrección en su caso, para garantizar su correcto funcionamiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo otorgado para la realización de este estudio por el Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI) CRN3056, que a su vez es apoyado por la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (Grant GEO-1128040). También agradecemos la colaboración de Lloyd's Register Foundation, una fundación de caridad que ayuda a proteger la vida y la propiedad mediante el apoyo a la educación relacionada con la ingeniería, la participación pública y la aplicación de la investigación.

REFERENCIAS

- Arenas, J. Ma., Carrero, G., Galache, J., Mediavilla, C., Silgado, A. y Vázquez, E. M. (2001). Actuaciones realizadas tras el accidente de Aznalcóllar. *Boletín Geológico y Minero*, Especial, 35-56. Recuperado de http://www.igme.es/boletin/2001/112_esp_2-2001/2-ACONTECIMIENTO.pdf
- Armendáris Villegas, E. J. (2016), Áreas naturales protegidas y minería en México: Perspectivas y recomendaciones. Tesis doctoral. México: CINBOR. Recuperado de http://dspace.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/497/armendariz_e.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Chavez, Jr. P. S. (1996). Image-Based Atmospheric Correction-Revisited and Improved, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(9), 1025-1036. Recuperado de http://static1.1.sqspcdn.com/static/f/891472/15133582/1321370214637/Chavez_P.S._1996.pdf?token=EYT7dHC1hgpoIwA6nJLjNlsKLm0%3D
- Comisión Nacional del Agua, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (2013). *Programa Detallado de Acciones de Gestión Integral para la Restauración Ecológica del Río Sonora*. Recuperado de http://www.ciad.mx/archivos/Programa_Detallado_Acciones_Rio_Sonora.pdf

- Corrales-Pérez, D. y Romero, F. M. (2016). Evaluación de la peligrosidad de jales en zonas mineras de Nicaragua y México y alternativas de solución. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(3), 427-446. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v65n3/v65n3a1.pdf>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2013, 13 de septiembre). Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. México: SEGOB. Recuperado de <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/APF/APC/SEMARNAT/Normas/Oficiales/NOM-141-SEMARNAT-2003.pdf>
- Díaz-Caravantes, R. E., Duarte Tagles, H. y Durazo Gálvez, F. M. (2016). Amenazas para la salud en el Río Sonora: análisis exploratorio de la calidad del agua reportada en la base de datos oficial de México. *Revista Salud UIS*, 48(1). Recuperado de <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistasaluduis/article/view/5406>
- Díaz-Caravantes, R. E., Duarte Tagles, H., Pallanez Murrieta, M., Moreno Vázquez, J. L., Mejía Santellanes, J. A. y Durazo Gálvez, F. M. (2017). *Análisis de los criterios para proteger la vida acuática: El río Sonora después del derrame minero de 2014*. Aqua-LAC-Vol 10-No.1 Recuperado de <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/07Diaz.pdf>
- European Space Agency-España. (2017). *El Programa Copérnico*. Recuperado de http://www.esa.int/es/ESA_in_your_country/Spain/El_programa_Copernico
- Fideicomiso Río Sonora. (2016). Recuperado de http://www.fideicomisoriosonora.gob.mx/docs/DPpresentacion_conferencia_derrame.pdf
- León Taquia, A. A. (2015). *Descripción, Descarga y Manipulación de Productos Sentinel-2*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/AlejandroLeon31/guia-sentinel2-espaol>
- López Sanchez, L. R. (2013). *Residuos mineros y la generación de drenaje ácido: Pruebas de laboratorio y su aplicación en el diseño, construcción y operación de depósitos*. Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería. México: UNAM. Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2556/TESIS.pdf?sequence=1>
- Mendivil-Quijada, H. (2012). Uso de imágenes satelitales aplicadas a la exploración por yacimientos minerales. *GEOMIMET*, 299, 9-20. Recuperado de http://www.geomin.com.mx/revista/WEB_G_299.pdf
- Orozco R., Muhech, V. (2012). *Anteproyecto del nuevo depósito para jales "Buenavista del Cobre" en Cananea, Sonora*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C. Recuperado de http://www.smg.org.mx/admArticulos/eventos/1_Reunion_Cancun/2_XXVI_Reunion_Nacional/15_Geotecnia_ambiental_y_depositos_mineros/I14ORSR_1.pdf
- Pérez Sáenz de Urturi, J. E. (2005). *La Minería Colonial Americana bajo la Dominación Española*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Biblioteca Universitaria. Memoria Digital de Canarias. Recuperado de <http://mdc.ulpgc.es/cgi-bin/showfile.exe?CISOROOT=/bolmc&CISOPTR=130&filename=131.pdf>
- Pinto Herrera, H. (2010). Desastre ecológico y ambiental en Huancavelica. *Investigaciones Sociales*, 14(25). Recuperado de http://sisbib.unmsm.edu.pe/bib-virtualdata/publicaciones/inv_sociales/N25_2010/pdf/a15.pdf
- Porto, M. F. S. (2016). *The tragedy of mining and development in Brasil: public health challenges. Perspectives*, 32(2), 1-3. Recuperado de http://www.scielo.br/pdf/csp/v32n2/en_0102-311X-csp-32-2-0102-311X00211015.pdf
- Ramos-Arroyo, Y. R., Siebe-Grabach, C. D. (2006). Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(1). Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742006000100004
- Servicio Geológico Mexicano [SGM] (2015), *Panorama Minero del Estado de Sonora*, 2015. Recuperado de <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/SONORA.pdf>
- Shimmer R. (2008). *A Remote sensing and GIS method for detecting land Surface áreas covered by copper mill tailings*. Ph. D. Candidate. Recuperado de <https://www.asprs.org/a/publications/proceedings/pecora17/0030.pdf>
- Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ecología. (2016). *Evidencias de las afectaciones a la integridad funcional de los ecosistemas del Río Bacanuchi y el Río Sonora por el derrame de la mina Buena Vista del Cobre: avances del diagnóstico ambiental*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/318098560/DPAvances-Diagnostico-Ambiental-Rio-Sonora>
- Wenbo, L., Zhiqiang, D., Feng, L., Dongbo, Z., Hailei, W., Yuanmiao, G., Bingyu, S. y Xiaoming, Z. (2013). A Comparison of Land Surface Water Mapping Using the Normalized Difference Water Index from TM, ETM+ and ALI. *Remote Sensing*, 5(11), 5530-5549. Recuperado de <http://www.mdpi.com/2072-4292/5/11/5530>