

Evaluación del potencial de uso de sedimentos de cuerpos de agua interiores en el Centro de México como materiales de construcción y fuente de elementos de tierras raras

Evaluation of the potential use of sediments from inland bodies of water in Central Mexico as building materials and source of rare earth elements

Oscar Coreño Alonso^{1*}, Julio Cesar Leal Vaca¹, Yann René Ramos Arroyo², Eladio Delgadillo Ruiz¹, Adrián Zamorategui Molina¹, Juan Coreño Alonso¹

¹Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, División de Ingenierías Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. C.P. 36000 Guanajuato, Gto., México.

²Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. C.P. 36000 Guanajuato, Gto., México.

^{1*}Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, División de Ingenierías Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. C.P. 36000 Guanajuato, Gto., México, Tel. 4731020100 ext. 5919. ocoreno@ugto.mx

*Autor de correspondencia

Resumen

Con el propósito de conocer la factibilidad de usos alternativos de los sedimentos acumulados en la presa La Esperanza, en el municipio de Guanajuato, estos fueron sometidos a análisis químicos cuantitativos. Se encontró que los contenidos de metales preciosos y tierras raras hacen factible el aprovechamiento económico de los sedimentos. Adicionalmente, los sedimentos, una vez tamizados y clasificados, se usaron para producir ladrillos. Los resultados de pruebas de resistencia en compresión, porosidad y adsorción se compararon con los de ladrillos producidos usando arcillas de comunidades de los municipios de Irapuato y Abasolo. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en los resultados de los ladrillos producidos con los tres tipos de arcillas usadas; por lo tanto, los sedimentos podrían ser usados para producir ladrillos. De esta forma, de los sedimentos se pueden extraer metales con alto valor comercial, y una vez procesados se pueden usar para hacer ladrillos usables en construcción.

Palabras clave: Sedimentos; ladrillos; tierras raras; metales preciosos.

Abstract

To know the feasibility of alternative uses of sediments accumulated in La Esperanza dam, in the municipality of Guanajuato, they were subjected to quantitative chemical analysis. It was found that the contents of precious metals and rare earths make the economic exploitation of the sediments feasible. Additionally, the sediments, after sieved, were used to produce bricks. The results of compression, porosity, and adsorption tests were compared with those of bricks produced using clays from communities in the municipalities of Irapuato and Abasolo. No statistically significant differences were found in the results of the bricks produced with the three types of clays used; therefore, the sediments could be used to produce bricks. In this way, metals with high commercial value can be extracted from the sediments, and once processed they can be used to make bricks for the construction sector.

Keywords: Sediments; bricks; rare earths; precious metals.

Recibido: 01 de septiembre de 2023

Aceptado: 22 de noviembre de 2023

Publicado: 31 de enero de 2024

Cómo citar: Coreño Alonso, O., Leal Vaca, J. C., Ramos Arroyo, Y. R., Delgadillo Ruiz, E., Zamorategui Molina, A., & Coreño Alonso, J. (2024). Evaluación del potencial de uso de sedimentos de cuerpos de agua interiores en el Centro de México como materiales de construcción y fuente de elementos de tierras raras. *Acta Universitaria* 34, e4000. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2024.4000>

Introducción

Importancia de los sedimentos

El deterioro de las funciones de las cuencas hidrológicas tiene importantes consecuencias negativas, ya que podría provocar la erosión y la reducción de la productividad del suelo (Food and Agriculture Organization [FAO], 2023). En las cuencas hidrológicas existe movilización de los materiales del suelo que llegan a zonas de acumulación.

Un escenario deseable para incrementar el tiempo de vida útil de una presa es desazolvar; sin embargo, es un tema que no está contemplado por los organismos reguladores del agua. La utilización de los materiales en los sedimentos de presas, y la eventual movilización para desazolvar la presa, podría ser viable si se conoce el potencial económico de los sedimentos y sus posibles usos. Por ejemplo, los sedimentos de los cuerpos de agua tienen aparentemente las propiedades necesarias para producir ladrillo.

En todas las cuencas hidrológicas se encuentran sedimentos depositados principalmente en las partes bajas donde la energía de movimiento es mínima debido a las bajas pendientes. En función de la ubicación del ambiente sedimentario, los tamaños de partícula varían desde muy gruesos a muy finos (Corbí & Martínez-Martínez, 2015). Los depósitos sedimentarios normalmente son materiales porosos. Esta porosidad es fundamental, pues permite el almacenamiento y la circulación de agua. Los sedimentos expuestos a la atmósfera pueden evolucionar como suelos con el paso del tiempo.

Un tipo particular de sedimentos son los que se retienen en las estructuras construidas para almacenar agua como presas y bordos. La cantidad de sedimentos que podrían encontrarse depende de las condiciones climáticas, del relieve y del grado de deforestación. En estos sitios no es deseable que se acumulen los sedimentos debido a que disminuye la capacidad de almacenamiento de los embalses.

En el estado de Guanajuato se encuentran 169 presas y bordos que representan un potencial de almacenamiento de 1780 millones de metros cúbicos (Mm^3) (https://presas.conagua.gob.mx/inventario/hnombre_presa.aspx). Estas presas se han construido con diversos propósitos: control de avenidas, abasto a poblaciones, riego, agostadero o infiltración. En el municipio de Guanajuato las presas más importantes son: Manuel Gonzalez (La Esperanza), La Soledad, La Purísima y Mata. Este trabajo se refiere a los sedimentos acumulados en la presa La Esperanza (su ubicación geográfica se muestra en la Figura 1).

La cuenca La Esperanza es un área natural protegida, tiene una extensión de 1832 ha y una diferencia de elevación de 2259 a 2748 metros sobre el nivel del mar (m. s. n. m.) (Martínez-Arredondo et al., 2015). La temperatura media anual varía entre 19 °C en las partes altas y 23 °C en la cortina. Administrativamente, esta subcuenca es parte de la cuenca del río Guanajuato, de la cuenca Lerma-Salamanca RH12Bd, de la región hidrológica 12 Lerma-Santiago. Se encuentra anidada dentro de la cuenca Lerma-Chapala, en la región hidrológica 12 Lerma-Santiago. Está situada entre los 21° 02' 52" y los 21° 03' 48" de latitud norte y los 101° 16' 10" y 101° 12' 43" de longitud oeste. La vegetación predominante es bosque de encino (*Quercus* sp.), cubriendo 13.67 km² aproximadamente, le sigue vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino con 2.55 km², pastizal inducido con 1.22 km² y vegetación secundaria herbácea de bosque de encino con 0.68 km². Los tipos de suelo predominantes en la cuenca son luvisoles y litosoles, que cubren 12.27 km² del total de la cuenca y los del tipo feozem con 5.08 km². Por su área, la cuenca se clasifica como microcuenca, es de tipo alta por presentar zonas montañosas. La precipitación media de la zona está entre los 650 mm y los 800 mm anuales, con mínimas de 400 mm y máximas de 1000 mm.

Las rocas que afloran en la cuenca La Esperanza son masivas; si presentan porosidad, es por fracturamiento (Randall et al., 1994). La columna litológica varía desde un complejo volcánico-sedimentario del Mesozoico, como diorita, tonalita y lutita, esta última metamorfozada a filitas presentando algunos lentes de sulfuros masivos vulcanogénicos. En la cuenca se encuentran al menos dos yacimientos de sulfuros masivos que en conjunto representan un millón de toneladas de minerales altos en pirita (Miranda-Gasca, 2000). Se encuentran también rocas volcánicas del Terciario. El contacto entre las rocas volcánicas del Terciario y las rocas del Mesozoico es una veta con mineralización epitermal del sistema de vetas de la Sierra. En el extremo noroeste (NW) se encuentra una zona de alteración hidrotermal que puede haber aportado elementos con importancia económica a las rocas en esta parte. La Figura 2 muestra a la cuenca La Esperanza con la geología de la zona y los principales afluentes.

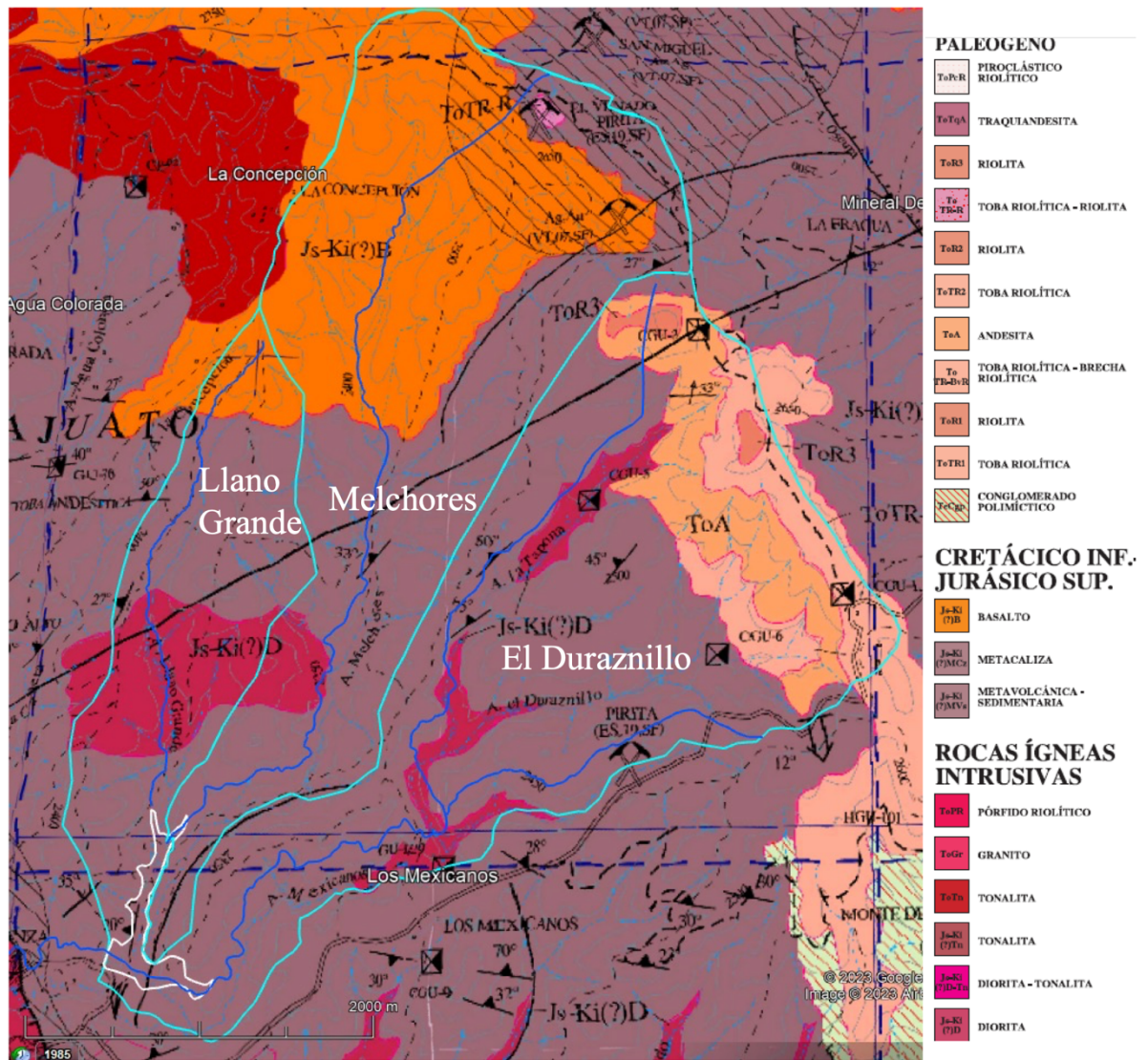


Figura 2. Delimitación de la cuenca La Esperanza y las subcuencas Llano Grande, Melchore y El Duraznillo, Guanajuato, Gto.
Fuente: Elaboración propia con la plataforma Google Earth con información de INEGI y Conagua (consultado en 2023).

En la cuenca hay tres subcuencas (de izquierda a derecha): Llano Grande, Melchores y El Duraznillo. La subcuenca Llano Grande tiene un canal principal de 3283 m, con una elevación mínima de 2280 m. s. n. m. y una máxima de 2477 m. s. n. m.; su extensión es de 1.962 km². La subcuenca Melchores tiene un canal principal de 6470 m, una elevación mínima a la cota del llenado de la presa de 2280 m. s. n. m. y una máxima de 2759 m. s. n. m. en el cerro "El Guapillo". Drena un área de 8.071 km², tiene una pendiente media de 6.40%, el tiempo de concentración es de 45.55 minutos, y el orden de corriente es de 3. La subcuenca El Duraznillo tiene el cauce principal, con una elevación mínima de 2280 m. s. n. m., una elevación máxima de 2682 m. s. n. m y una elevación media de 2440 m. s. n. m. La longitud del cauce principal es aproximadamente de 7130 m, tiene una pendiente media de 5.28%, el tiempo de concentración es de 49.04 minutos, el orden de corriente es de 3 y el área drenada aproximada de la zona es de 7.26 Km². Esta información fue obtenida mediante un modelo digital de elevaciones (MDE) creado a partir de las cartas topográficas F14C43e y F14C43f a escala 1:20 000 publicadas en 2015 por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y con ayuda del *software* comercial Qgis 3.30 de código libre.

El embalse de la presa La Esperanza cubre aproximadamente 0.20 km² del total de la superficie de la cuenca. La cortina de esta presa empezó su construcción el 5 de mayo de 1887 y quedó terminada en abril de 1893. Tenía originalmente una capacidad de 1.8 millones de metros cúbicos (Borja-Pérez, 2021); no obstante, debido al azolve producido durante cerca de 135 años, actualmente su capacidad es de menos del 50% de la original (Navarro, 2015).

Por su parte, los ladrillos son pequeños bloques rectangulares de materiales finos cocidos (limo y arcilla). Los materiales utilizados para su fabricación varían mucho en composición de un lugar a otro; si se trata de sedimentos, varían según el tipo de roca en las cuencas. Las arcillas están compuestas principalmente por sílice, alúmina, calcio, hierro, manganeso, azufre y fosfatos, con diferentes proporciones. En una casa o en un edificio tradicional, la mayor parte de los muros se construyen con ladrillos unidos con concreto, por lo que la mayor parte del volumen de estas construcciones está formada por ladrillos. Esto hace a los ladrillos muy importantes en la industria de la construcción. Los ladrillos normalmente se fabrican usando sedimentos que se extraen de tierras de cultivo, lo que desde luego es un problema desde un punto de vista de sustentabilidad.

Los ladrillos se fabrican en diferentes colores, como rojo oscuro, violeta, marrón, gris, rosa o marrón opaco, dependiendo de la temperatura de cocción de la arcilla durante la fabricación. La temperatura de cocción varía de 900 °C a 1200 °C. Los ladrillos tienen una densidad promedio de 1500 kg/m³.

Los ladrillos de arcilla se utilizan para diferentes propósitos, incluida la construcción, el revestimiento, la estética, la fabricación de pisos y la pavimentación. Los ladrillos de construcción generalmente son fuertes y duraderos. Los ladrillos de revestimiento se utilizan con fines estéticos y están disponibles en diferentes tamaños, colores y texturas. Los ladrillos para pisos se utilizan en superficies de pisos terminados y generalmente son lisos y densos, con alta resistencia a la abrasión.

Los ladrillos de arcilla son muy duraderos y resistentes al fuego y requieren muy poco mantenimiento. Tienen propiedades aislantes moderadas que hacen que las casas de ladrillo sean más frescas en verano y más cálidas en invierno, en comparación con las casas construidas con otros materiales de construcción. Los ladrillos de arcilla también son conductores deficientes y no combustibles (Mamlouk & Zaniewski, 2017).

En el estado de Guanajuato se han realizado muy pocos estudios para evaluar el potencial económico o posible uso en aplicaciones ambientales de los sedimentos en las presas. En este trabajo se evalúa el potencial uso de los sedimentos de la presa La Esperanza como materiales para la construcción de ladrillos o como fuente de tierras raras y metales preciosos, lo que puede ser una estrategia de desazolve de la presa.

Las tierras raras incluyen los elementos químicos: escandio, itrio, lantano, cerio, praseodimio, neodimio, prometio, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio. El término "tierras raras" es engañoso, ya que no se refiere a su abundancia en la corteza terrestre, sino a la apariencia poco llamativa de los minerales de los que fueron aisladas originalmente. Casi todos los elementos de tierras raras (REE, por sus siglas en inglés) en la corteza terrestre son más abundantes que el oro, la plata o el platino, mientras que el cerio (Ce) es el más abundante de todos los REE y es más común en la corteza terrestre que el cobre o el plomo. Los metales de tierras raras son vitales para algunas de las industrias de más rápido crecimiento del mundo: catalizadores, imanes de Nd, cerámica, vidrio, metalurgia, aleaciones para baterías, electrónica y elementos fluorescentes (Charalampides *et al.*, 2016).

Los metales preciosos incluyen a los elementos oro (Au), plata (Ag), platino (Pt), paladio (Pd), iridio (IR), rodio (Rh) y rutenio (Ru). Todos, excepto la plata, son materiales resistentes a la corrosión, con altas densidades, altos puntos de fusión, elevada conductividad eléctrica y excelentes propiedades mecánicas. Con propiedades tan únicas, dichos metales son aplicados como materiales de contacto en electrónica, en sensores en la industria del acero, para revestimientos de vidrio e incluso en propulsores de satélites. Además, Au, Ag, Pt y Pd son usados comúnmente en joyería (Seehra & Bristow, 2018).

En este trabajo se evalúa el potencial de uso de los sedimentos de la presa, Manuel Gonzalez (La Esperanza), teniendo como premisa que la composición química y las características físicas permitan su utilización como materiales para la construcción de ladrillos y como fuente de tierras raras y metales preciosos, lo que puede ser una estrategia para financiar los costos de desazolve de las presas.

Materiales y métodos

Se evaluaron las características físicas de los ladrillos elaborados con materiales de dos localidades en Guanajuato: la comunidad "Lo de Juárez", en Irapuato, y la comunidad "El Encinal", en Abasolo; y se compararon con los obtenidos de los sedimentos de la presa La Esperanza (Figura 1 y Tabla 1). Los materiales para la elaboración de estos ladrillos fueron analizados químicamente utilizando para la difracción de rayos X un equipo marca Rigaku, modelo Ultima IV, con filtro de Ni y radiación Cu K α . Para la fluorescencia de rayos X se utilizó un equipo marca Rigaku, modelo NEX CG, con tubo de rayos X usando ánodo de Pd.

Muestreo

En la Figura 3 se identifican específicamente para la presa de La Esperanza los seis puntos de muestreo tomados de los dos cauces principales correspondientes a las microcuencas 1 y 2. Se realizó un muestreo en tres puntos de cada microcuenca. La altitud de los puntos fue tomada a partir de la cota de 2280 m. s. n. m. con ayuda de un GPS de la marca Garmin y corroborado con el MDE realizado. En la Tabla 1 se muestran las coordenadas de los puntos de muestreo dentro del embalse de la cuenca La Esperanza.

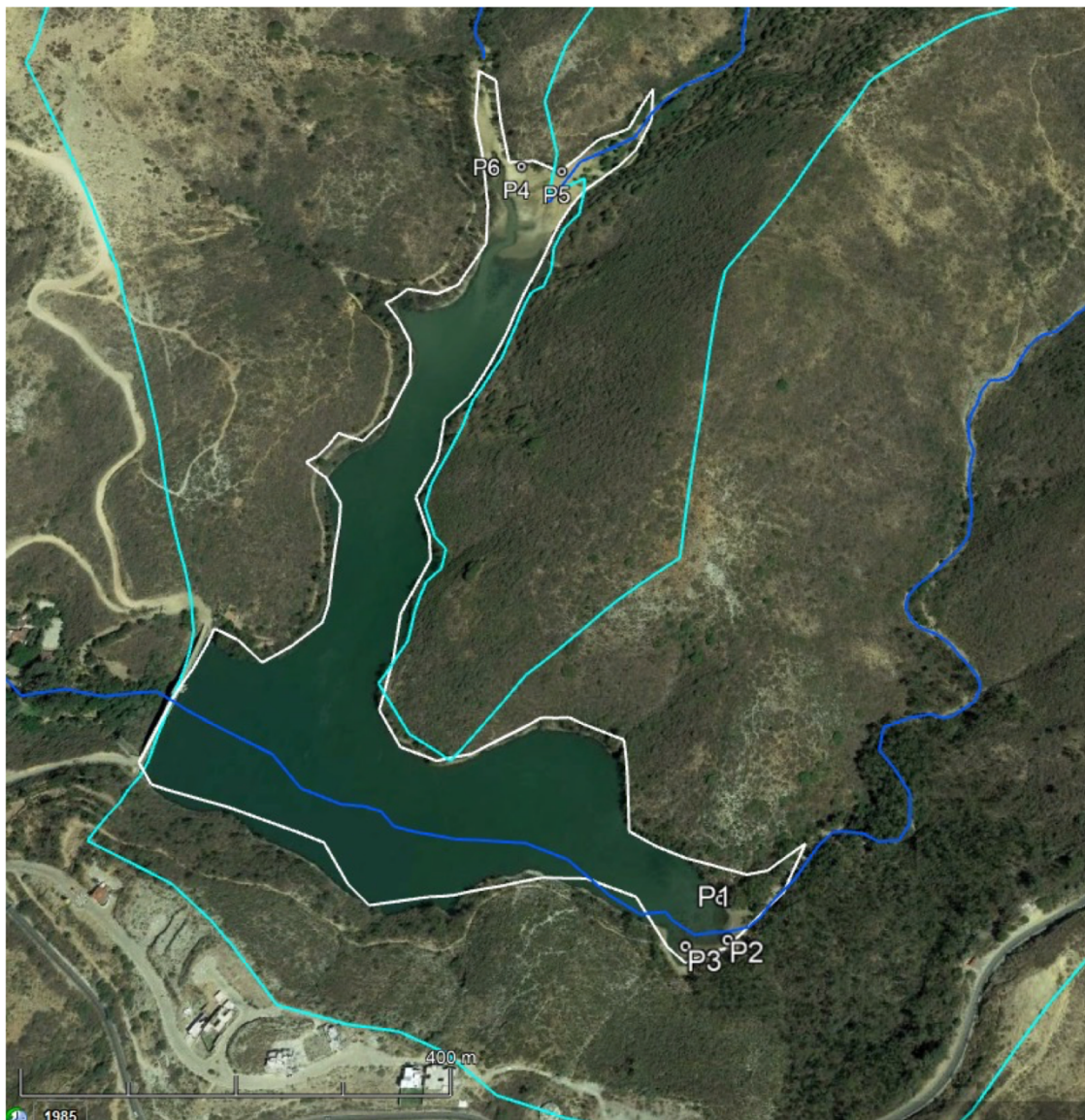


Figura 3. Ubicación de los puntos de muestreo dentro de la presa La Esperanza.
Fuente: Elaboración propia con información de INEGI y Conagua.

Tabla 1. Ubicación de los puntos de muestreo en sedimentos de la presa La Esperanza.

Muestreo	Latitud N	Longitud W	Altitud (m. s. n. m)
P1	21° 2' 53.30"	101° 15' 2.17"	2280
P2	21° 2' 52.07"	101° 15' 1.83"	2280
P3	21° 2' 51.88"	101° 15' 3.15"	2280
P4	21° 3' 21.31"	101° 15' 12.93"	2280
P5	21° 3' 21.09"	101° 15' 11.29"	2280
P6	21° 3' 21.16"	101° 15' 14.11"	2280

Fuente: Elaboración Propia.

Resultados

Dimensiones y peso

En relación con las dimensiones y peso de los ladrillos elaborados con materiales de tres localidades (comunidad "Lo de Juárez", en Irapuato; comunidad El Encinal en Abasolo; y sedimentos de la presa La Esperanza, en Guanajuato), las Tablas 2, 3 y 4 muestran las características físicas de los ladrillos. Para elaborar cada ladrillo se utiliza un volumen aproximado de 2744 cm³; es decir, por metro cúbico de sedimento se pueden obtener 364 ladrillos, sin contar pérdidas de producción, evaluadas éstas de tres ladrillos por cada 1000. El costo promedio de elaboración de cada ladrillo es de \$2.00 pesos mexicanos y su valor en el mercado es de \$2.50 pesos mexicanos, promedio, precio que varía según la oferta y la demanda hasta \$3.00 pesos mexicanos.

Tabla 2. Ladrillos elaborados con sedimentos de la comunidad El Encinal, Abasolo.

No elemento	Geometría (cm)			Peso (kg)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Peso vol (t/m ³)
	Alto	Largo	Ancho				
1	6.7	26.9	13.2	3.120	354.18	2361.2	1.321
2	6.8	26.7	13.2	3.130	352.44	2408.3	1.300
3	6.7	27.2	13.7	2.900	374.00	2505.8	1.157
4	6.7	26.9	13.7	3.330	367.18	2472.3	1.347
5	6.7	27.3	13.8	2.880	376.29	2521.1	1.142

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3. Ladrillos elaborados con sedimentos de la comunidad Lo de Juárez, Irapuato.

No elemento	Geometría (cm)			Peso (kg)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Peso vol (t/m ³)
	Alto	Largo	Ancho				
1	7.0	27.2	13.4	3.370	365.39	2545.5	1.324
2	6.4	26.9	13.6	2.980	365.40	2338.5	1.274
3	6.9	26.7	13.3	3.250	355.55	2453.3	1.325
4	7.0	26.9	13.3	3.400	357.77	2504.4	1.358
5	6.8	27.0	13.4	3.070	362.70	2478.5	1.239

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4. Ladrillos elaborados con sedimentos de la Presa La Esperanza.

No elemento	Geometría (cm)			Peso (kg)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Peso vol (t/m ³)
	Alto	Largo	Ancho				
1	6.1	26.4	13.0	2.460	343.65	2084.8	1.180
2	6.3	26.2	12.9	2.520	338.41	2120.7	1.188
3	6.3	26.4	13.0	2.630	341.89	2153.9	1.221
4	6.5	26.6	13.0	2.630	346.25	2250.6	1.169
5	6.4	26.2	12.8	2.580	335.79	2160.2	1.194

Fuente: Elaboración Propia.

Los ladrillos sinterizados tienen la apariencia mostrada en la Figura 4. El color rojo más oscuro de los ladrillos elaborados con arcillas de la presa La Esperanza se debe al alto contenido de minerales de hierro (Fe), como se reporta en la sección de análisis por fluorescencia de rayos X.

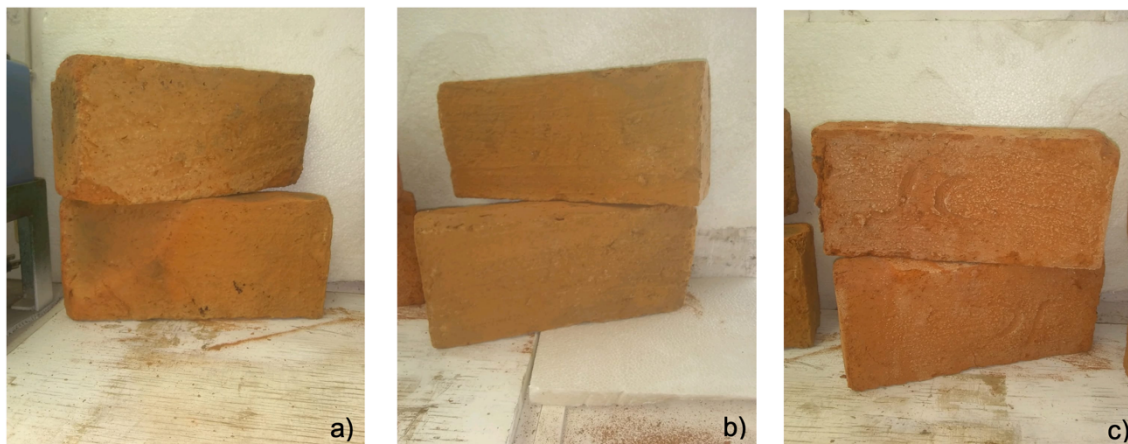


Figura 4. Ladrillos sinterizados con sedimentos provenientes de a) comunidad de El Encinal, b) comunidad Irapuato, y c) Presa La Esperanza, Guanajuato.
Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con la norma NMX-C441-ONNCCE-2005, los ladrillos deben tener dimensiones de alto hasta 15 cm, de largo hasta 30 cm y de ancho de 10 cm a 30 cm. Todos los ladrillos reportados en las Tablas 2 a 4 cumplen con esta parte de la norma.

Resistencia a la compresión y absorción

Considerando la resistencia a la compresión y absorción, en las Tablas 5, 6 y 7 se muestran las propiedades de esas variables.

Tabla 5. Propiedades físicas y resultados del ensayo de compresión de ladrillos elaborados con sedimentos de la comunidad El Encinal, Abasolo.

No elemento	Carga (kg)	Carga (N)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	Peso saturado (g)	Peso seco (g)	Absorción (%)
1	7040	69 039	20	1.9	3680	2880	28
2	9680	94 928	27	2.7	3940	3220	22
3	5460	53 544	15	1.4	3940	3230	22
4	9150	89 731	25	2.4	3720	2950	26
5	6500	63 743	17	1.7	3870	3170	22
		Promedio	21	2.04			24

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6. Propiedades físicas y resultados del ensayo de compresión de ladrillos elaborados con sedimentos de la comunidad Lo de Juárez, Irapuato.

No elemento	Carga (kg)	Carga (N)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	Peso saturado (g)	Peso seco (g)	Absorción (%)
1	7080	69 431	19	1.9	4000	3190	25
2	4820	47 268	13	1.3	3940	3200	23
3	8970	87 966	25	2.5	3760	2980	26
4	7340	71 981	21	2.0	4050	3280	23
5	8740	85 710	24	2.4	3820	3130	22
		Promedio	19	2.01			25

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 7. Propiedades físicas y resultados del ensayo de compresión de ladrillos elaborados con sedimentos de la presa La Esperanza, Guanajuato.

No elemento	Carga (kg)	Carga (N)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)	Peso saturado (g)	Peso seco (g)	Absorción (%)
1	6270	61 488	18	1.8	3300	2560	29
2	6670	65 410	20	1.9	3070	2450	25
3	9920	97 282	29	2.8	3090	2470	25
4	6270	61 488	18	1.8	3040	2450	24
5	8790	86 200	26	2.6	3130	2530	26
		Promedio	22	2.18			26

Fuente: Elaboración Propia.

Fluorescencia de rayos X

Considerando el análisis de la fluorescencia de rayos X, la Tabla 8 muestra los datos de los componentes químicos de los sedimentos.

Tabla 8. Análisis por fluorescencia de rayos X de los sedimentos.

Muestra\Elemento % peso.	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe
1	4.72	12.36	28.07	2.36	1.32	2.69	0.07	48.42
2	22.41	7.60	24.13	2.33	1.49	1.90	0.32	39.83
3	9.17	10.39	33.27	2.34	1.12	3.81	0.00	39.89
4	1.67	10.77	24.08	1.87	1.08	1.94	0.04	58.54
5	4.72	12.37	28.08	2.36	1.32	2.69	0.07	48.44
6	8.05	16.64	40.42	2.69	1.59	2.79	0.04	27.77
Promedio	8.46	11.69	29.67	2.33	1.32	2.64	0.09	43.81
Muestra\Elemento ppm	Rb	Sr	Y	Nb	Sn	Sb	Te	Ba
1	153	64.4	43.2	94.0	65.3	0	0	790
2	184	80.9	55.1	35.6	146	28.9	14.9	1172
3	93.4	715	45.6	40.4	29.8	0	0	3716
4	213	41.5	31.0	67.1	96.4	56.1	0	1470
5	160	99.7	44.7	38.8	56.0	69.9	0	841
6	145	206	54.5	46.8	45.8	14.2	ND	715
Promedio	158.0	201.2	45.7	53.8	73.2	28.2	3.0	1450.7
Muestra\Elemento ppm	Ir	Pt	Au	Pb	Re	Eu	Gd	Dy
1	2.9	0	1.7	51.1	57.8	4.4	6.3	1.0
2	2.6	0	0	29.0	26.0	3.1	2.0	1.0
3	2.1	2.1	3.1	92.5	35.6	0	4.7	0
4	1.6	0	1.8	41.7	62.1	4.1	1.0	1.0
5	1.3	0	2.3	87.8	49.4	4.2	0.00	4.9
6	1.1	2.2	1.8	82.1	ND	4.3	3.9	5.3
Promedio	1.9	2.1	1.8	64.0	46.2	3.36	3.0	2.2

Fuente: Elaboración Propia.

El color rojo de los ladrillos producidos en este trabajo se debe a los altos contenidos de Fe, reportados en la Tabla 8. Los contenidos de tierras raras reportados en la Tabla 8 concuerdan, en lo general, con lo reportado para las rocas volcánicas de la cuenca La Esperanza (Mengelle-López, 2013).

Difracción de rayos X

La Figura 5 muestra los patrones de difracción de las muestras. En los patrones de difracción de rayos X se pudo identificar las fases minerales Montmorrillonita, Anortita, Cuarzo y Maghemita. La cuantificación de las fases se realizó mediante el método de las proporciones de las intensidades relativas (RIR), incluido en el software Match! versión 1.11K. Los resultados se muestran en la Tabla 9. El máximo contenido de la fase Maghemita fue de 14.9%. Esta fase tiene un 40% de Fe, por lo que se podría pensar que debe haber bajas concentraciones de este elemento en las muestras. Sin embargo, en la Tabla 8 se observan contenidos de Fe de hasta 58%. Esta diferencia se debe a que la difracción se hizo con radiación de Cu, lo que produce fluorescencia del Fe, en el fondo de los patrones, y disminuye la intensidad de los picos de la Maghemita, haciendo parecer que hay menos de esta fase de lo que en realidad contienen las muestras.

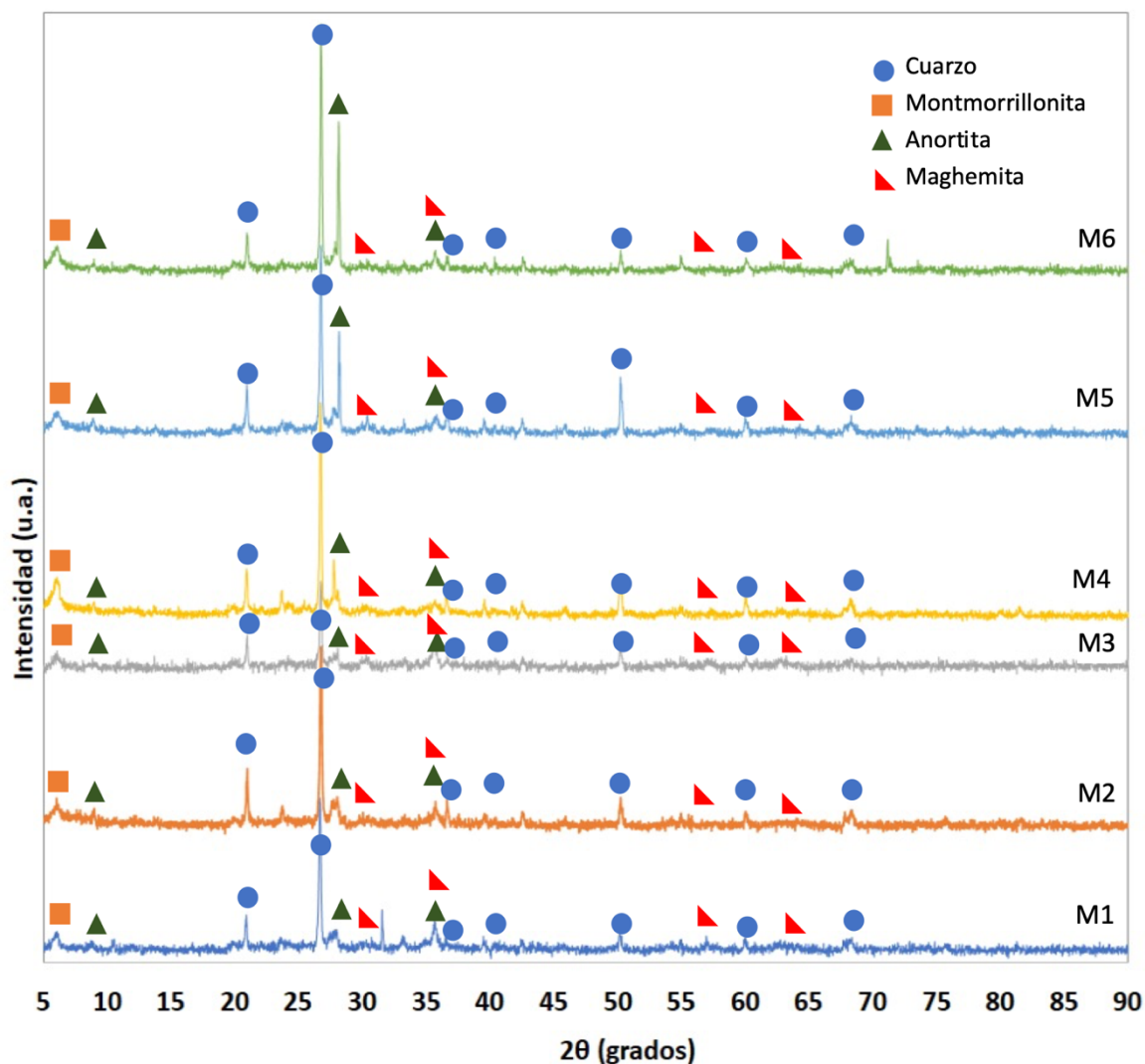


Figura 5. Patrones de difracción de rayos X de los sedimentos obtenidos de la presa de La Esperanza, Guanajuato.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Cuantificación de las fases presentes en los sedimentos, en los patrones de difracción de rayos X, por el método de las proporciones de las intensidades relativas.

Muestra	Montmorillonita (Na,Ca) _{0.3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	Anortita CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Cuarzo SiO ₂	Maghemita Fe _{2.667} O ₄
1	2.0	38.1	45.0	14.9
2	1.5	49.2	46.4	2.9
3	4.3	44.7	45.0	4.3
4	4.4	37.4	51.7	6.5
5	0.9	58.2	37.0	3.8
6	1.2	67.5	28.1	3.1

Fuente: Elaboración Propia.

Las tierras raras reportadas en la Tabla 8 podrían estar asociadas a este óxido de Fe, como se ha reportado previamente (Cook *et al.*, 2022). Los contenidos de cuarzo entre 28% y 52% son, en general, más bajos que los reportados para las rocas volcánicas submarinas de la cuenca La Esperanza, entre 56% y 76% (Mengelle-López, 2013).

Discusión

Con respecto al análisis realizado en los ladrillos, la prueba Anova para resistencia a la compresión dio como resultado un valor de F de 0.1739, mientras que para la absorción el valor de F fue 1.2639. El valor crítico de F para confianza de 0.05 es 3.8853 y para confianza de 0.01 es 6.9266. Ambos valores críticos son mayores que los valores F experimentales, por lo que podemos decir con 95% y 99% de confianza que no hay diferencia significativa entre los valores de resistencia y absorción de los ladrillos elaborados con sedimentos de las tres localidades de donde se obtuvieron los sedimentos.

De acuerdo con la norma NMX-C441-ONNCCE-2005, las piezas hechas a mano deben tener absorción máxima promedio de 25% y máxima individual de 30%. Todos los ladrillos probados tuvieron absorciones menores a 30%, y sólo los ladrillos de la presa La Esperanza no cumplen con el criterio de promedio de absorción menor a 25%. El promedio es sólo ligeramente mayor (26%), por lo que se puede buscar mejorar el proceso de sinterización para tener un ladrillo más denso. También se puede repetir el muestreo, pues si los ladrillos hubiesen estado en otras localizaciones dentro del horno, habrían quedado más compactos.

Los valores de promedio de resistencia mínima a la compresión reportados en las Tablas 5 a 7 son menores de los requeridos (25 kgf/cm²) en la norma NMX-C441-ONNCCE-2005 (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2005), por lo que no cumplen con esta parte de la norma. Por otra parte, las resistencias medias a compresión también están muy por debajo de lo que indican las normas, con valor de 90 kgf/cm² (Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2021).

Aunque los valores de resistencia de ladrillos artesanales varían ampliamente por el proceso de fabricación, se han encontrado algunos valores para comparación. Por ejemplo, se ha reportado (Instituto Tecnológico de Occidente, 2017) resistencia para ladrillos de cuatro diferentes ladrilleras del municipio de Tlaquepaque, Jalisco, con valores promedio de cinco ladrillos de 32.75 kgf/cm², 72.65 kgf/cm², 29.41 kgf/cm² y 32.76 kgf/cm². Estos valores son superiores a los reportados en este trabajo, hasta por un factor de alrededor de 3.3. Estas diferencias se podrían deber al tipo de arcillas usadas, pero también a diferencias en el proceso de sinterización de los ladrillos. En general, mayores temperaturas y tiempos más largos de sinterización producen ladrillos más compactos y, por lo tanto, con mejores propiedades mecánicas.

En relación con los sedimentos, la geología de la cuenca La Esperanza ha sido descrita ampliamente (Mengelle-López *et al.*, 2013; Miranda-Gasca, 2000; Randall *et al.*, 1994). En la parte norte afloran tobas volcánicas fracturadas, riolitas, que pueden funcionar como zonas de recarga a acuíferos locales. En esta cuenca se encuentran dos tipos de yacimientos: sulfuros masivos volcanogénicos (VMS, por sus siglas en inglés) (minas Los Mexicanos con Fe-Cu-Zn y Guapillos con Fe-Cu-Pb-Zn ± Au-Ag) y yacimientos de tipo epitermal, que son los clásicos del Distrito Minero de Guanajuato (Randall *et al.*, 1994). La presencia de elementos con potencial económico en los sedimentos se debe a la erosión de estos yacimientos o rocas con alteración hidrotermal. Como los sedimentos ya están en la superficie y no hay necesidad de moler rocas, su costo de procesamiento como fuente de tierras raras es mucho más bajo que el de otras fuentes usadas para obtener estos elementos.

Otro valor agregado de los sedimentos de la presa La Esperanza que se ha estudiado previamente es que pueden retener contaminantes. Por ejemplo, Coreño-Alonso *et al.* (2023) propusieron usar los sedimentos acumulados en el embalse de la presa para adsorber arsénico. Se realizaron experimentos de adsorción por lotes para medir la influencia del pH, tiempo de contacto, concentración inicial de arsénico y tratamientos químicos. Estos se realizaron utilizando reactivo piraña (una mezcla de tres partes de ácido sulfúrico concentrado y una parte de una solución de peróxido de hidrógeno al 30%) y ácido trimésico, para estudiar sus efectos en la capacidad de adsorción. Se reportó que "una gran parte de la adsorción parece deberse a las partículas más finas de los sedimentos, compuestas principalmente de minerales de hierro, mientras que la materia orgánica casi no contribuye a la adsorción". La máxima capacidad de adsorción observada experimentalmente fue de 137 mg/kg para los sedimentos intactos, después de cinco horas de reacción, que es ligeramente inferior a la medida para los tratados con ácido trimésico. Las máximas capacidades de adsorción teórica determinadas fueron de 640 mg/kg para los sedimentos tratados con reactivo piraña y ácido trimésico y de 120 mg/kg para sedimento sin tratar. Estos valores están dentro del rango reportado para algunos sedimentos colectados en China (Coreño-Alonso *et al.*, 2023).

Aunque estos resultados son buenos, la cantidad de sedimentos que se requerirían para adsorber arsénico de agua -por ejemplo, de pozos en comunidades rurales del norte del estado de Guanajuato- es pequeña, comparada con la cantidad de sedimentos acumulados en la presa la Esperanza, alrededor de un millón de metros cúbicos. Por este motivo, se buscó usar los sedimentos para producir ladrillos, sin la necesidad de añadir sedimentos de tierras de cultivo, generalmente agregados para dar mayor plasticidad a las mezclas con que se fabrica el ladrillo.

La eliminación del uso de sedimentos de tierras de cultivo contribuirá a dejar de lado la compra/venta de estas tierras para producir ladrillos, pues éstas son cada vez más escasas en el estado de Guanajuato, lo cual es otro punto a favor del uso de los sedimentos de la presa La Esperanza, que se han venido acumulando a una tasa promedio de alrededor de 6700 m³ por año. Tomando en cuenta que la tolva típica de material de construcción tiene capacidad de 6 m³, estos sedimentos depositados por año requerirían tres tolvas por día para ser sacados de la presa. Esto es suficiente para tener una ladrillera de tamaño medio operando continuamente.

Conclusiones

Los sedimentos acumulados en la presa La Esperanza reúnen las características químicas para ser usados como fuente de metales preciosos y tierras raras. Adicionalmente, es factible usar los sedimentos para producir ladrillos convencionales, reduciendo la necesidad de usar sedimentos de tierras de cultivo. Estas alternativas hacen económicamente viable el desazolve de los cuerpos de agua, en este caso, de la presa La Esperanza.

Agradecimientos

Al laboratorio LICAMM- UG por los análisis de XRD y FRX.

Conflictos de interés

Los autores no tienen conflicto de interés con la investigación realizada.

Referencias

- Borja-Pérez, J. A. (2021). *Cien años sirviendo a Guanajuato. Presa de la Esperanza Isauro Rionda Arreguín en Guanajuato y sus Presas*. SIMAPAG. www.guanajuatocapital.gob.mx/biblioteca-virtual-guanajuatense/
- Cook, N. J., Ciobanu, C. L., Ehrig, K., Slattery, A. D., & Gilbert, S. E. (2022). Micron- to atomic-scale investigation of rare earth elements in iron oxides. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.967189>
- Corbí, H., & Martínez-Martínez, J. (2015). Interpretando ambientes sedimentarios: taller de sedimentología con arenas como actividad didáctica de Ciencias de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23(2), 242-252. <https://raco.cat/index.php/ECT/article/view/306523/396505>
- Coreño-Alonso, O., González-Gómez, L. E., & Coreño-Alonso, J. (2023). Evaluación de dos materiales geológicos de bajo costo como adsorbentes para As. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 14(2), 261-299. <https://doi.org/10.24850/10.24850/j-tyca-14-2-7>
- Charalampides, G., Vatalis, K., Karayannis, V., & Baklavariadis, A. (2016). Environmental defects and economic impact on global market of rare earth metals. *Materials, Science and Engineering*, 161(1), 012069. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012069>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (25 de abril de 2005). *Industria de la Construcción-Mampostería-Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones Para Uso no Estructural-Especificaciones y Métodos de Ensayo*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5267404&fecha=10/09/2012#gsc.tab=0
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2023). *Conjunto de Herramientas para la Gestión Forestal Sostenible (GFS)*. <https://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules>
- Gaceta Oficial de la Ciudad de México. (20 de Julio de 2021). *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería de la Ciudad de México*. <http://cgsservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/745.pdf>
- Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (2017). *PROYECTO DE APLICACIÓN PROFESIONAL (PAP), Programa de diseño responsable*. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjprZy7o6X9AhXuKkQIHtC6A3wQFnoECAwQAQ&url=https%3A%2F%2Fpre.iteso.mx%2Fbitstream%2Fhandle%2F11117%2F5219%2FProyecto%2Bladrilleras.pdf%3Fsequence%3D2&usg=AOvVaw3U914NNT1nWcaRDP11FuyM>
- Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. (2017). *Materials for civil and construction engineers* (4a ed.). Pearson Education.

- Martínez-Arredondo, J. C., Jofre, R., Ortega, V. M., & Ramos, Y. R. (2015). Descripción de la variabilidad climática normal (1951-2010) en la cuenca del río Guanajuato, centro de México. *Acta Universitaria*, 25(6), 31-47. <https://doi.org/10.15174/au.2015.799>
- Mengelle-López, J. J., Canet, C., Prol-Ledesma, R. M., González-Partida, E., & Camprubí, A. (2013). Secuencia vulcano-sedimentaria La Esperanza (Cretácico Inferior) al norte de Guanajuato, México: Importancia en la exploración de sulfuros masivos vulcanogénicos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(3), 511-525. <http://www.ojs-igl.unam.mx/index.php/bsgm/article/view/474/236>
- Miranda-Gasca, M. A. (2000). The metallic ore-deposits of the Guerrero Terrane, western Mexico: an overview. *Journal of South American Earth Sciences*, 13(4-5), 403-413. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(00\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(00)00032-8)
- Navarro, L. (2015). *Historia de Titanes, el agua para consumo humano en la ciudad de Guanajuato*. SIMAPAG.
- Randall, J. A., Saldaña, E., & Clark, K. F. (1994). Exploration in a volcano-plutonic center at Guanajuato, México. *Economic Geology*, 89(8), 1722-1751. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.89.8.1722>.
- Seehra, M. S., & Bristow, A. D. (2018). Overview of the properties and applications of noble and precious metals. En M. S. Seehra & A. D. Bristow (eds.), *Noble and precious metals - properties, nanoscale effects and applications* (pp. 11-12). InTech.