

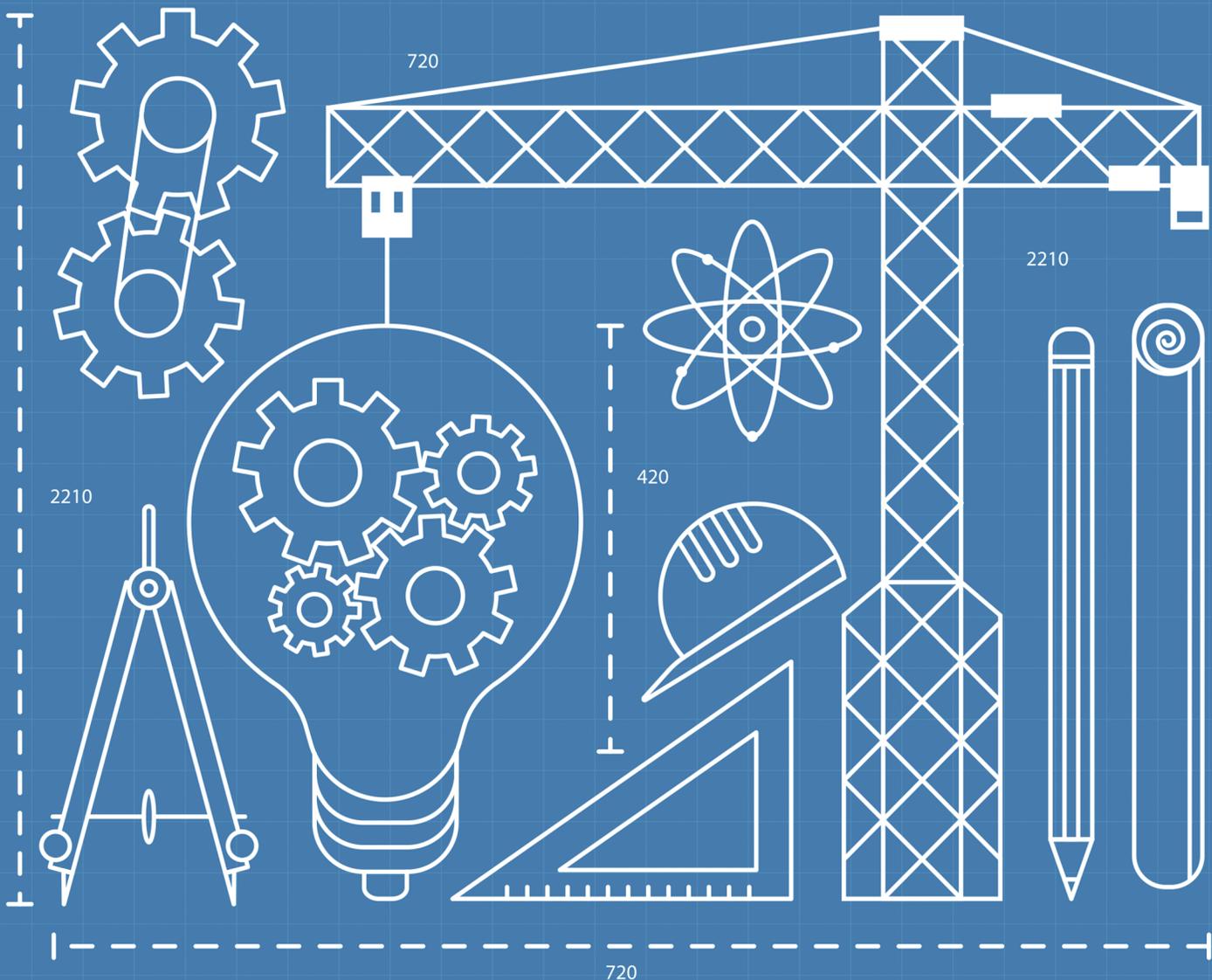
REVISTA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CULIACAN

REVISTA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UAS

Junio-diciembre 2023 Núm. 5



U N I V E R S I D A D A U T Ó N O M A D E S I N A L O A



ENGINEERS

ISSN: () e-ISSN: 2683-2445



REVISTA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UAS

Órgano de difusión de la Facultad de Ingeniería, UAS

Dr. Robespierre Lizárraga Otero
Encargado del despacho de rectoría

Dr. Candelario Ortíz Bueno
Secretario General

M.C. Salvador Pérez Martínez

Dr. Mario Nieves Soto

Secretario de Administración y Finanzas

Director General de Investigación y Posgrado

M.I Guillermo Jesús Lazcano Beltrán
Presidente del Colegio de Ingeniería y
Tecnología

Dr. Carlos Ayala Barrón
Director de Editorial UAS

EDITOR

Dr. Edén Bojórquez Mora, Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ingeniería Culiacán, Calzada de las Américas y Universitarios, s/n, Ciudad Universitaria, 80040 Culiacán Rosales, Sinaloa Culiacán Rosales, Sin., E-mail: eden@uas.edu.mx

Equipo Editorial

Lic. Karla Verónica López Ley, Coordinadora y Responsable de Maquetación.

Ing. Simón René Ávila López, Gestor del sitio web.

MTE. Alan Gabriel Lazcano Beltrán, diseño y fotografía.

Comité Editorial

Dr. Edén Bojórquez Mora

Universidad Autónoma de
Sinaloa, México

Dr. Alfredo Reyes Salazar

Universidad Autónoma de
Sinaloa, México

Dr. Juan Bojórquez Mora

Universidad Autónoma de
Sinaloa, México

Dr. Eduardo René Fernández González

Universidad Autónoma de
Sinaloa, México

Dr. Fernando García Páez

Universidad Autónoma de
Sinaloa, México

Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez

Universidad Autónoma de

Sinaloa, México

Dr. Amador Terán Gilmore

Universidad Autónoma Metro-
politana, México

**Dr. Mauro Pompeyo Niño
Lázaro**

Universidad Nacional Autóno-
ma de México, México

**Dr. Francisco L. Silva Gon-
zález**

Universidad Nacional Autóno-
ma de México, México

Dr. Julián Carrillo

Universidad Militar de Nueva
Granada, Colombia

Dra. Sonia Elda Ruiz Gómez

Universidad Nacional Autóno-
ma de México, México

Dr. Gustavo Palazzo

Universidad Tecnológica Na-
cional de Argentina, Argentina

Dr. Antonio Formisano

University of Naples Federico
II, Napoli, Campania, Italia

Dr. Francisco López Almansa

Universidad Politécnica de Ca-
taluña, Barcelona, España

Dr. Ivano Iovinella

University of Naples Federico
II, Napoli, Campania, Italia

Dra. Yu Jiao

Tokyo Institute of Tecnology,
Japón

Dr. Julián Londono

University of Exeter, Reino
Unido

Perfil del Editor

Dr. Eden Bojórquez Mora

Profesor Investigador de Tiempo Completo Titular C de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Obtuvo el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa con mención honorífica. Posteriormente curso estudios de Maestría y Doctorado en Ingeniería en el Instituto de Ingeniería de la UNAM donde obtuvo el grado con mención honorífica. Cuenta con Posdoctorado por el Departamento de Ingeniería Estructural de la Universidad de Nápoles Federico II en Italia. Profesor-Investigador Repatriado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa (2008-2009). Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 2, y miembro honorífico del Sistema Sinaloense de Científicos y Tecnólogos, así como del Cuerpo Académico Consolidado de Estructuras y Mecánica Básica.

El Dr. Bojórquez ha recibido numerosas distinciones como el PREMIO Nacional a la Mejor tesis de Doctorado (Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, SMIS); Ingeniero Civil del Año por parte del Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Sinaloa; mejor artículo Científico de la Revista de Ingeniería Sísmica SMIS como autor único; VICEPRESIDENTE de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica; EDITOR de la Revista de Ingeniería Sísmica la más prestigiosa en su área escrita en español, Ingeniería y Tecnología UAS, EDITOR de Advances in Civil Engineering y Editor invitado



de revistas como Buildings, Shock and Vibration entre otras indizadas en JCR y SCOPUS. Líder en el ámbito de la Ingeniería Sísmica como lo demuestra la formación de varios Doctores en Ingeniería todos miembros del SNI y algunos de ellos líderes de Cuerpos Académicos (PRODEP-UAS). Ha formado a más de 100 estudiantes de verano científico y tesis de licenciatura, maestría y doctorado, donde ha obtenido PREMIOS por dirigir las mejores tesis de Licenciatura y Posgrado a nivel Nacional y Estatal. Cuenta con más de 300 artículos en congresos científicos y revistas indizadas JCR y CONACYT. Responsable de iniciar la Maestría y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la Facultad de Ingeniería Culiacán UAS, donde ha sido Coordinador desde 2009 (programas del SNP del CONAHACYT). Actualmente, es MIEMBRO del Comité de Resiliencia de la Infraestructura del Colegio de Ingenieros Civiles de México y ha participado en más de 30 proyectos de investigación regionales, nacionales e internacionales en su mayoría como responsable. Es revisor de las revistas indizadas y congresos sobre estructuras, sismología, ingeniería sísmica e inteligencia artificial de mayor prestigio en el mundo. Ha

dado varias conferencias incluyendo magistrales en países como Emiratos Arabes Unidos, y es revisor de proyectos para asignar fondos a grupos de investigación por parte del Ministerio Italiano de Educación, así como del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías y de varias instituciones a nivel nacional e internacional.

Sus trabajos de investigación orientados principalmente a mitigar los efectos de los sismos sobre la infraestructura, lo han llevado a ser pionero en el desarrollo de medidas de intensidad sísmica a nivel mundial, siendo el único mexicano que ha propuesto una medida de intensidad sísmica generalizada. Entre sus aportaciones científicas destaca la creación de una nueva medida de intensidad sísmica (Intensidad IB) representativa del potencial destructivo de un terremoto, la cual está siendo reconocida por investigadores de las instituciones más prestigiadas a nivel mundial tales como las Universidades de Stanford en Estados Unidos, Imperial College de Londres, Bolonia, Pavía y Nápoles en Italia, Grenoble Francia, entre otras. Actualmente, el Dr. Bojórquez está trabajando en la generación de registros sísmicos, de viento, mapas de peligros y riesgos naturales, fragilidad y confiabilidad de estructuras, edificios con disipadores de energía, diseño sismo-resistente sustentable, diseño resiliente, efectos de réplicas, inteligencia artificial y otros temas encaminados a mejorar tanto los Reglamentos de Construcción del Mundo como el comportamiento estructural de las construcciones a nivel mundial sometidas a los efectos de fenómenos naturales.

Índice de contenido

7 Uso de SIGs para la evaluación de la disponibilidad de espacios verdes urbanos en Culiacán

Using GIS to asses availability to urban greenspaces in Culiacan city

Evangelina Ley-Aispuaro, Cruz Elisa Torrecillas Núñez, Edén Bojórquez, Gabriela Morán Delgado

17 Mortero polimérico elaborado con resina híbrida de poliéster insaturado (a partir de reciclaje de botellas de PET post-consumo) con nanoacoplante silano

Polymeric mortar made with unsaturated polyester hybrid resin (from post-consumer PET bottle recycling) with silane nanocoupling

A. Bórquez-Mendivil, J.A. Verdugo-Sánchez, A. Hurtado-Macías², J.E. Leal-Pérez, R.A. Vargas Ortíz, J. Flores-Valenzuela, F.G. Cabrera-Covarrubias, B.A. García-Grajeda, J.L. Almaral-Sánchez

28 Análisis de propiedades mecánicas e instrumentación de maquina universal para ensayo de materiales metálicos

Analysis of mechanical properties and instrumentation of a universal machine for testing metallic materials

Omar Payán-Serrano, Ismael Diaz-Peña, Brandon De La Cruz Nuñez, Fabrizio Llanes-López.

Uso de SIGs para la evaluación de la disponibilidad de espacios verdes urbanos en Culiacán

Using GIS to assess availability to urban greenspaces in Culiacan city

Evangelina Ley-Aispuro^{1*}, Cruz Elisa Torrecillas Núñez², Edén Bojórquez², Gabriela Morán Delgado³

RESUMEN

En el presente estudio se hace una descripción de la disponibilidad de áreas verdes en la ciudad de Culiacán, así como su distribución, superficie y accesibilidad para la población, de acuerdo a las distancias necesarias para llegar a ellas y la dotación por persona en la ciudad de Culiacán, México. La metodología usada es la propuesta por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la determinación del indicador de espacios verdes urbanos. Se aplicó un análisis geoespacial, determinando las áreas de influencia de las áreas verdes mayores a 1 ha, en un radio de 300 m, usando como herramienta de análisis el software ArcGIS 10.7.1. El análisis realizado fue a nivel de Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEBs) con datos e información geoestadística del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Los resultados muestran que la dotación de superficie verde por habitante en la ciudad de Culiacán es de 5.3 m²/hab., la cual está muy por debajo de los 9 a 15 m²/hab., que recomienda la Organización Mundial de la Salud (OMS). Además, de acuerdo a su disponibilidad y distribución, solo son útiles al 20% de la población.

Recibido: diciembre 2022
Aceptado: julio 2023
Publicado: diciembre 2023

Palabras Clave:

áreas verdes urbanas,
accesibilidad, disponibilidad,
dotación, SIGs

Keywords:

urban green areas, accessibility,
availability, allocation, GIS
(Geographic Information
Systems)

ABSTRACT

This study presents a description of the availability of green areas in the city of Culiacán, including their distribution, surface area, and accessibility for the population based on the required distances to reach them and the allocation per person in Culiacán, Mexico. The methodology used follows the proposal by the World Health Organization (WHO) for determining the indicator of urban green spaces. A geospatial analysis was conducted, determining the influence areas of green areas larger than 1 hectare within a 300-meter radius, using ArcGIS 10.7.1 software as the analysis tool. The analysis was performed at the level of Basic Geostatistical Areas (AGEBs) using geostatistical data and information from the National Institute of Statistics and Geography (INEGI). The results show that the allocation of green space per inhabitant in the city of Culiacán is 5.3 m²/person, which is significantly below the WHO's recommended range of 9 to 15 m²/person. Additionally, based on their availability and distribution, these green areas are only useful to 20% of the population.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad más de la mitad de la población mundial reside en áreas urbanas (Mallqui Shicshe, 2013) y según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), esta cifra aumentará al 70% en 2050. En el caso de México, de acuerdo con datos del INEGI, la población urbana en 2010 ya era del 78%. El crecimiento

*Autor para correspondencia. Ley-Aispuro Evangelina
Dirección de correo electrónico: eley@uadec.edu.mx

¹Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Arquitectura unidad Saltillo

²Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería Culiacán

³Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Educación y Humanidades unidad Saltillo

acelerado de las ciudades trae consigo una mayor demanda de servicios básicos y bienes de consumo. El déficit de las infraestructuras y la precariedad de los servicios urbanos básicos, las hacen vulnerables a impactos severos provocados por fenómenos de origen natural o humano (ONU-HABITAT, 2019).

Diversos estudios han demostrado los beneficios de las áreas verdes en los espacios urbanos para la calidad de vida de sus habitantes, mejorando las cualidades del entorno urbano y contribuyendo a la consecución de objetivos y expectativas en sus dimensiones físicas, sociales y emocionales (Nowak et al., 1997; Sorensen et al., 1998; Reyes y Figueroa, 2010; Flores-Xoloxotzi, 2012). De la misma forma, se ha demostrado su contribución a la mitigación y adaptación al cambio climático, mediante la captura de CO₂ y la intercepción de escurrimientos pluviales con la consiguiente disminución de los tiempos de concentración y picos de avenidas en los eventos de lluvia, además de su contribución a la recarga de acuíferos (Sorensen et al., 1998, Reyes y Figueroa, 2010; Rodríguez, 2015; Vásquez, 2016). De ahí la importancia de incluir en la planeación de las ciudades los espacios verdes, como parte de las estrategias de creación de ciudades sustentables y resilientes establecida en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. En el presente trabajo se consideraron como áreas verdes urbanas los espacios públicos como parques, jardines, plazas ajardinadas, deportivos ajardinados y cementerios.

2. ANTECEDENTES

Reyes et al. (2010) realizaron un análisis de áreas verdes en Chile, evaluando su distribución, superficie y accesibilidad mediante métricas de paisaje. Para ello digitalizaron las mismas a partir de fotografía aérea y Sistemas de Información Geográfica (SIGs). Las métricas utilizadas fueron: superficie total, número, índice de fragmento más grande, e índice de cohesión, entre otros. Encontraron que el 91% de las áreas verdes urbanas tiene tamaño menor a 5,000 m².

Por su parte, Pérez-Medina y López-Farfán (2015) realizaron un análisis de las áreas de vegetación en Mérida y de las condiciones que determinan su presencia y distribución. La metodología se basó en el procesamiento de imagen de satélite para captar la cobertura arbórea, se usó Google Earth como herramienta para medición y cálculo de superficies y recorridos de campo. Los resultados arrojan que

las áreas verdes y cobertura arbórea se vinculan al mercado de vivienda y sus tipologías, a los procesos de gestión y gobernanza, y a la participación social.

Barros et al. (2015) desarrollaron un estudio en el que determinaron la superficie de las áreas verdes del Barrio Potengi, Natal-RN, Brasil, a través de revisiones bibliográficas, consulta en Google Earth y verificaciones en campo. Encontraron que el área verde total es de 2.2 Km², que corresponden al 27.54% del área del territorio de la región. Y corresponde en su mayor parte a plazas y camellones, por lo que recomiendan ampliar la arborización a los espacios públicos para el bienestar de la población.

Huang et al. (2017) evaluaron el cambio en los beneficios a la salud generados por los espacios verdes urbanos en 28 megaciudades en todo el mundo entre 2005 y 2015 utilizando la disponibilidad y la accesibilidad como indicadores indirectos. Se mapearon las cubiertas terrestres de 28 megaciudades usando 10,823 escenas de imágenes Landsat y un clasificador de bosques aleatorio que se ejecuta en Google Earth Engine. Luego calcularon la disponibilidad y accesibilidad de los espacios verdes urbanos utilizando los mapas de cobertura del suelo y los datos de población en cuadrículas. Encontraron que la disponibilidad media de espacios verdes urbanos en estas megaciudades aumentó del 27.63% en 2005 al 31.74% en 2015. La accesibilidad media de los espacios verdes urbanos aumentó del 65.76% en 2005 al 72.86% en 2015.

Morales-Cerdas et al. (2018) realizaron un estudio para determinar las condiciones ambientales de las áreas verdes, utilizando indicadores como herramienta para la gestión urbana en dos ciudades de Costa Rica. Utilizaron imágenes de satélite Rapid Eye, clasificación supervisada y fotointerpretación. Se determinaron 11 indicadores, entre ellos, el porcentaje de áreas verdes públicas y privadas, tipo y tamaño de especies arbóreas, zonas verdes efectivas per cápita, cercanía de los poblados a ellas y accesibilidad a las mismas. Encontraron que el área verde per cápita (m²/hab.) fue de 24.6 en el Carmen y de 2.7 en Heredia. En ambos distritos los ciudadanos encuestados indicaron la necesidad de contar con más áreas verdes, resaltando el valor recreativo, ecológico y turístico de estos espacios.

Ayala-Azcárraga et al. (2019), analizaron los patrones del uso en nueve parques la Ciudad de México, para relacionarlos con su efecto en el bienestar de los usuarios. Encontraron que, si existe correlación entre

la manera en que los usuarios utilizan esas áreas y aspectos como la distancia, abundancia de arbolado, seguridad, limpieza y calidad del espacio.

González-Kuk y otros, en 2019, hicieron un análisis de las áreas verdes en Córdoba, Veracruz, aplicaron un análisis ortogonal basado en la interpretación de imágenes de satélite de Google Earth y Sistemas de Información Geográfica. Encontraron que, en la ciudad

de Córdoba, las áreas verdes están localizadas sin una aparente relación con las ubicaciones de las zonas de mayor densidad de la población y que la proporción de área verde por habitante fue de 4.02 m², por debajo de la mitad de la recomendada por la OMS. (González-Kuk et al., 2019). De acuerdo a González-Kuk, para diferentes autores, la dotación de superficie verde por habitante difiere como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Dotación recomendada de superficie verde por habitante según diferentes autores.

Dotación	Fuente	Observaciones
40 m ² /hab.	Wang (2009)	No se especifica si son áreas de libre acceso
8 a 12 m ² /hab.	Salvador (2003)	No se especifica si son áreas de libre acceso
9 m ² /hab.	ONU (2015b)	
40.5 m ² /hab.	Dahl y Molnar (2003)	Indican que es un Sistema de parques

Fuente: González-Kuk et al., 2019

3. METODOLOGÍA

Características del Sitio de Estudio

Culiacán de Rosales es una ciudad media, capital del estado de Sinaloa, localizada al noroeste de la República Mexicana entre las coordenadas 107°20' y 107°32' de longitud oeste y 24°43' y 24°53' de latitud norte. Tiene una altitud promedio de 53 msnm (INAFED, 2010). En la figura 1 se muestra la localización de la ciudad de Culiacán.

Culiacán tiene alto potencial turístico, entre sus recursos naturales cuenta con tres ríos, una presa y 261 Km de litoral. Su índice de pobreza es de 29.8, el más bajo de la entidad y un grado de marginación muy bajo. En el tema de transporte y movilidad urbana no existen estrategias adecuadas que desincentiven el uso del automóvil y faciliten modos de transporte no motorizado, que fomenten el uso del transporte público enfocado al bajo consumo energético, que impulsen el modelo de ciudad compacta, con usos de suelo mixtos compatibles, así como el esquema de calle completa,

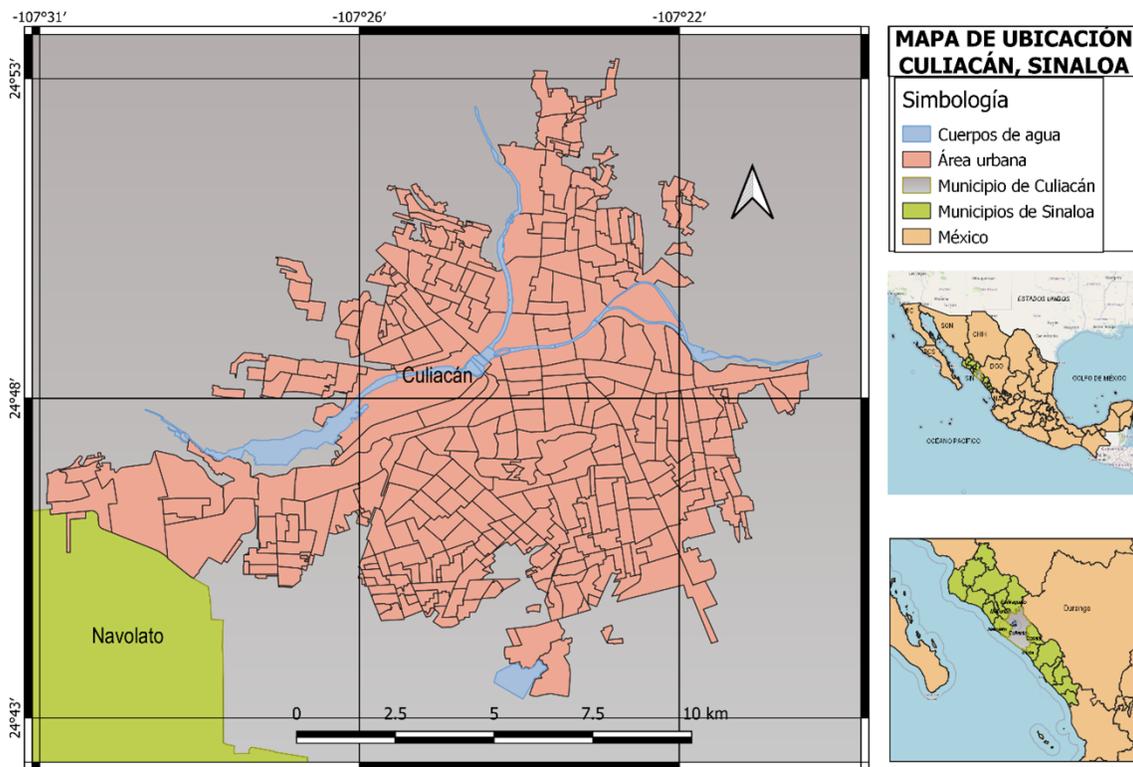


Figura 1. Mapa de ubicación de la ciudad de Culiacán

como un medio para favorecer la accesibilidad universal y generar condiciones adecuadas para la movilidad de personas y mercancías (PDES, 2017).

Respecto al parque habitacional y la densidad urbana, de acuerdo al Plan Estatal de Desarrollo Urbano, con datos del INEGI, determinó una tasa de crecimiento de la vivienda de 2.3% y una dinámica demográfica de 1.4%. La densidad urbana media de la entidad es de 46.81 hab/ha, que es una densidad baja y requiere una gran cantidad de terreno para el desarrollo urbano y genera una gran presión sobre las áreas de conservación ecológica y sobre la introducción de servicios en zonas periféricas. El suelo urbano de Culiacán ocupaba en 2015 una superficie de 12,932 ha con una proyección de 15,536 ha para el 2030. De acuerdo con la base de datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), el municipio de Culiacán aparece con un índice de peligro municipal por inundación “alto”. (PEDS, 2017). La ciudad de Culiacán cuenta con áreas verdes para recreo como la

Isla de Orabá, el Parque las Riberas, el Jardín Botánico, el Parque “Ernesto Millán Escalante”, el Centro Cívico Constitución y el Parque Lineal Agricultores, además de parques vecinales distribuidos por la ciudad (Varela, A., 2018).

Método

La metodología usada es la propuesta por la Organización Mundial de la Salud para la evaluación de la disponibilidad o accesibilidad de espacios verdes, mediante el uso de un indicador de accesibilidad de espacios verdes urbanos. Esta metodología se describe en el documento Urban green spaces and health. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2016. De acuerdo con Gómez (2005), la Organización Mundial de la Salud, recomienda para las ciudades la cifra de 9 m²/hab. Aunque la Comunidad Económica Europea, en algunos documentos, ha señalado la conveniencia de alcanzar estándares de 10 a 20 m²/hab. (Gómez, 2005). En este trabajo se consideran las

áreas verdes bajo manejo; es decir, no se consideran las áreas periurbanas con vegetación, ya que se refiere a aquellas que dan respuesta a las necesidades de convivencia y socialización de los habitantes de las ciudades. Por otro lado, disminuyen el estrés ambiental, mejorando la calidad del aire, disminuyendo el ruido, la contaminación visual y la seguridad viaria (Gómez, 2005)". De acuerdo a la literatura, la dotación de área verde por habitante se calcula a partir del mapa de áreas verdes y se divide entre la población (Valarezo et al., 2022).

La figura 2 muestra un diagrama de flujo con los pasos que describen la metodología utilizada:

Los datos utilizados corresponden a la base de datos del INEGI y el Instituto Municipal de Planeación Urbana (IMPLAN) Culiacán, y el software utilizado es ArcGIS, versión 10.7.1.

Preparación de datos

Se inicia con un archivo de ArcMap en blanco. Se añaden las capas de datos de AGEBS y áreas verdes al archivo, se establece el sistema de coordenadas a utilizar.

Para el análisis de las áreas verdes de Culiacán, se añadieron datos correspondientes a las AGEBS urbanas de la ciudad, las áreas verdes registradas en el IMPLAN Culiacán como Equipamiento Recreativo, Cuerpos de agua, y Municipios.

Para el análisis de accesibilidad, se seleccionaron las áreas verdes con una superficie mayor o igual a 1 ha, creando una capa para esta selección y determinando la superficie total de estos espacios. En seguida se creó un buffer a 300 m de radio para determinar el área de influencia de estas superficies. Después se seleccionaron las AGEBS cuyo centroide

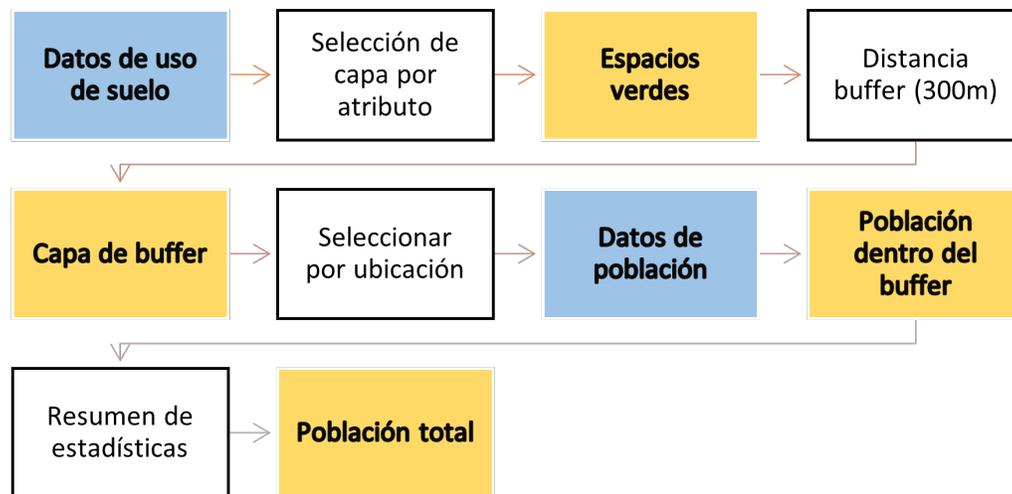


Figura 2. Diagrama de flujo que muestra los pasos a seguir en la metodología propuesta

se ubica dentro de estos radios de influencia. El porcentaje de población servida por estos espacios se determinó calculando el número de habitantes en las AGEBS seleccionadas, dividido por la población total de la ciudad y multiplicado por 100. Para calcular la dotación de áreas verdes por habitante, se usaron las herramientas de ArcMap para obtener la superficie total de áreas verdes y se dividió por el número total de habitantes resultado de la suma de habitantes en las AGEBS urbanas de la ciudad.

4. RESULTADOS

El número de habitantes con acceso a áreas verdes con una superficie mayor a 1 ha fue de 131,479 hab. La población urbana total al 2010 era de 675,773 hab, por lo que el porcentaje de población con acceso a áreas

verdes con superficie mayor a 1 ha resultó ser 19.45%. La superficie total de áreas verdes es de 3,580,461.52 m² y para una población urbana total de 675,773 hab., se tiene una dotación de áreas verdes por habitante igual a 5.30 m²/hab., que está muy por debajo del requerimiento mínimo de 9 m²/hab., recomendado por la OMS.

Se construyó un mapa para evaluar la disponibilidad de espacios verdes, en el que se puede observar la distribución de los espacios verdes y sus zonas de influencia.

En la figura 3 se muestra el mapa de distribución de áreas verdes y sus zonas de influencia, delimitadas por un buffer a 300 m a la redonda de cada superficie verde. El buffer muestra una superficie en la cual, la distancia de cualquier punto dentro de ella está a una distancia no mayor de 300 m de la zona verde. En este mapa de

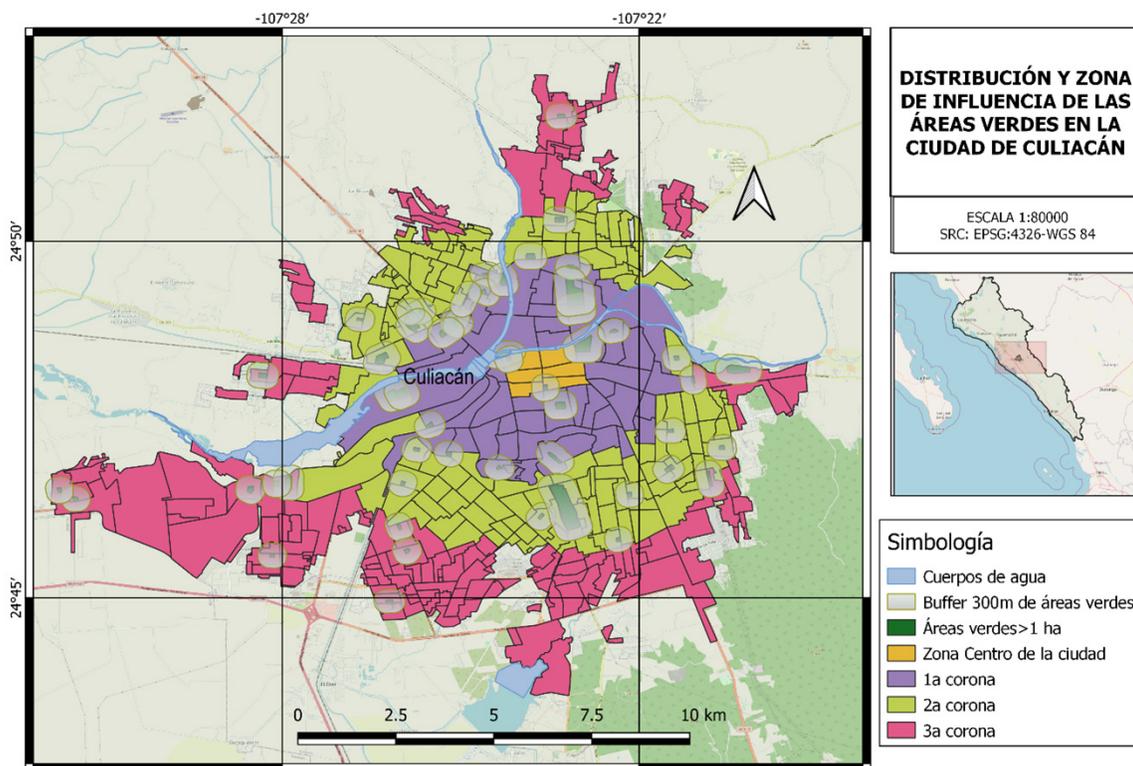


Figura 3. Mapa de distribución y zona de influencia de las áreas verdes con superficie mayor a 1 ha

distribución y zona de influencia de las áreas verdes mayores a 1 ha, puede apreciarse que la distribución de las mismas no es suficiente ni equitativa, debido a que se encuentran distribuidas principalmente en la primera y segunda corona de la ciudad, las cuales tienen una menor densidad de población. La primera corona corresponde a la urbanización más antigua de la ciudad después de la Zona Centro, y la tercera corona corresponde a la urbanización más reciente. Existe un gran porcentaje de espacios que no cuentan con áreas verdes mayores a una hectárea disponibles en un radio de 300 m.

En la figura 4 se muestra la distribución de las áreas verdes con respecto a las distintas densidades

de población en la ciudad. Se observa que las áreas verdes de la ciudad no están dispuestas acorde a la distribución de la población. Se aprecia que las zonas con mayor densidad de población tienen menor disponibilidad de áreas verdes, las cuales no todas corresponden a zonas marginadas, sino a la segunda y tercera corona de la ciudad que corresponden a espacios de más reciente formación. Cabe aclarar que la densidad de población de los lugares cercanos a la Zona Centro tiende a disminuir debido al proceso de gentrificación, el cual implica la transformación de los espacios por cambios en el uso de suelo y la demanda de espacios comerciales.

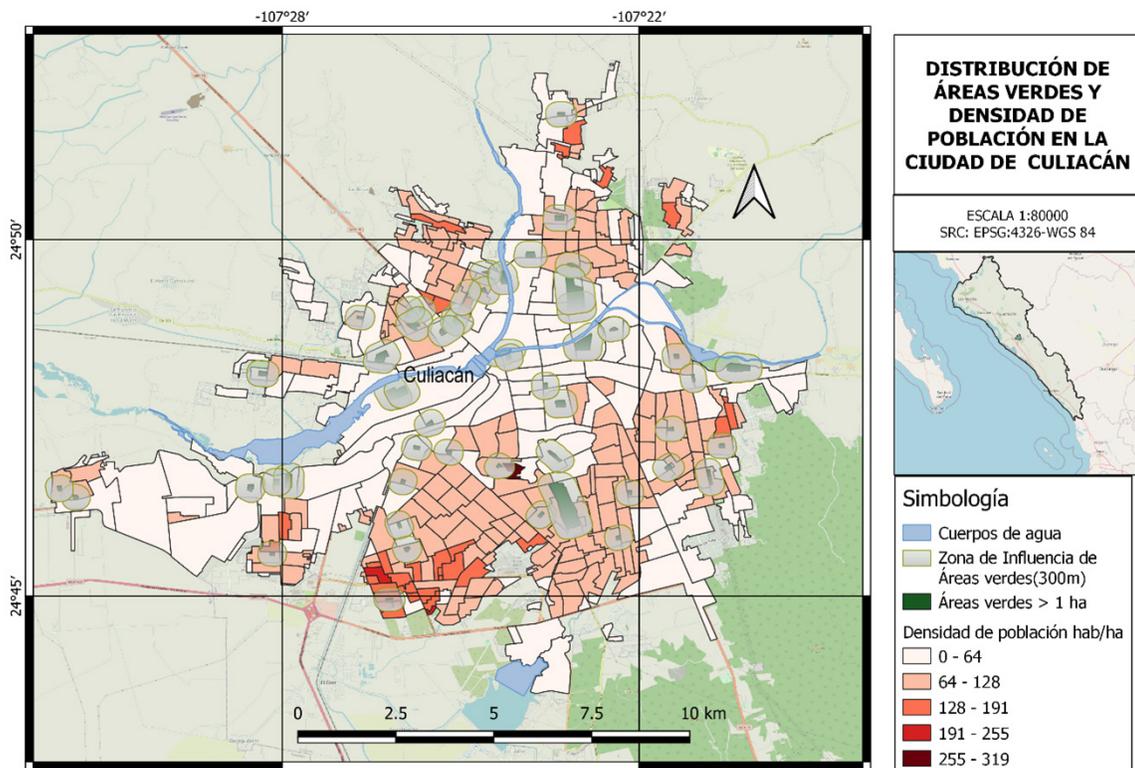


Figura 4. Distribución de áreas verdes en relación a la densidad de población

5. CONCLUSIONES

El uso de los Sistemas de Información Geográfica como herramienta de análisis espacial, facilita la evaluación de la disponibilidad de espacios verdes urbanos. En este estudio se evaluó la dotación de áreas verdes por habitante y resultó 5.3 m²/hab, mientras que a nivel mundial, los índices recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de las Naciones Unidas son de 9 m²/hab y 16 m²/hab como mínimo. Diversos estudios muestran que, en algunas ciudades de Latinoamérica como Santiago de Chile, la dotación es de 3.2 m²/hab, en Lima, Perú se tienen 3 m²/h de áreas verdes, la provincia de Loja en Ecuador presenta 4.19 m²/h, en cambio en un estudio para el Distrito Federal, ahora Ciudad de México, el índice de áreas verdes es de 15.1 m²/h. Por lo que se puede concluir que la dotación de áreas verdes en la ciudad de Culiacán no cumple con las recomendaciones de la OMS, sin embargo, presenta mejores condiciones que otras ciudades de Latinoamérica respecto a la dotación de áreas verdes. El espacio verde per cápita es el indicado para evaluar la disponibilidad de áreas verdes en las ciudades, llamado también índice verde urbano (IVU), como lo indican Valarezo y otros (2022).

La accesibilidad se determina midiendo la distancia en radios concéntricos desde el parque más cercano, e identificando la densidad de población que vive dentro de las zonas. En este estudio se observó una distribución tal que menos del 20% de la población tiene acceso a las áreas verdes. Se considera una buena accesibilidad cuando al menos el 75% de la población tiene acceso a por lo menos un tipo de área verde (Rueda y otros, 2012, citado por Valarezo y otros, 2022), por lo que se puede decir que existe poca accesibilidad a áreas verdes en la ciudad de Culiacán.

Se observa potencial para la recuperación de espacios municipales para el establecimiento de áreas verdes, tanto en espacios recreativos como vialidades, de manera que se puedan subsanar las deficiencias encontradas respecto a la dotación y disponibilidad de áreas verdes para los habitantes de la ciudad de Culiacán. Con esto se contribuiría a lograr asentamientos humanos seguros, sustentables y resilientes, acorde con la Agenda 2030. Se recomienda hacer estudios sobre la disponibilidad de agua para el riego de nuevas áreas verdes, dado que pudiera ser una de las limitantes para el incremento de áreas verdes. Otros factores que influyen son la planeación

y el recurso disponible para realizar los cambios y dar mantenimiento a las áreas verdes. Otra forma aumentar la disponibilidad de áreas verdes consiste en la creación de jardines verticales y azoteas verdes tanto en espacios públicos como privados.

REFERENCIAS

Arellano Ramos, B., & Roca Cladera, J. (2018). Áreas verdes e isla de calor urbana. Libro de proceedings, CTV 2018: XII Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual: "Ciudades y Territorios Inteligentes": UNCuyo, Mendoza, 5-7 septiembre 2018 (pp. 417-432). Centre de Política de Sol i Valoracions, CPSV/Universitat Politècnica de Catalunya, UPC.

Ayala-Azcárraga, C., Diaz, D., & Zambrano, L. (2019). Characteristics of urban parks and their relation to user well-being. *Landscape and Urban Planning*, 189, 27-35

Barros, L., da Silva, V., Alves, G., Pinheiro, L., do Nascimento, I., Dias, P... & de Farias Gomes, B. (2015). Diagnóstico Das Áreas Verdes Públicas Do Bairro Potengi, Natal/Rn. *Holos*, 5, 130-141.

De Sinaloa, G.D.E. (2022). Plan Estatal de Desarrollo 2022-2027. Gobierno del Estado de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México. Recuperado de <https://ped.sinaloa.gob.mx/wp-content/uploads/2022/04/PED27-compressed.pdf>

Flores-Xolocotzi, R. (2012). Incorporando desarrollo sustentable y gobernanza a la gestión y planificación de áreas verdes urbanas. *Frontera norte*, 24(48), 165-190.

Gómez, F. (2005). Las zonas verdes como factor de calidad de vida en las ciudades. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, 37(144), 417.

González-Kuk, G., Muñoz-Márquez, R., García-Albarado, J. & Gómez-Merino, F. (2019). Áreas verdes urbanas en Córdoba, Veracruz, cantidad, ubicación y acceso: un análisis ortogonal. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(7), 1565-1578.

Huang, C., Yang, J., Lu, H., Huang, H., & Yu, L. (2017). Green spaces as an indicator of urban health: evaluating its changes in 28 mega-cities. *Remote Sensing*, 9(12), 1266.

INAFED Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. SEGOB Secretaría de Gobernación 2010© <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM25sinaloa/index.html>

IPCC, 2013: Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

IPCC, 2014: Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs.

INEGI. (s.f.). Población. Rural y urbana. Recuperado 2 agosto, 2019, de http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P

Krishnamurthy, L., Nascimento, J., Keipi, K., Nowak, D., Dwyer, J., & Childs, G. (1998). Áreas verdes urbanas en Latinoamérica y el Caribe. Ciudad de México.

Mallqui Shicshe, A. A. (2013). ¿Resiliencia urbana o ciudades resilientes? Retrieved from http://amallquis.files.wordpress.com/2013/04/articulo_resiliencia.pdf

México: Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018, Gobierno de la República [México], 2013, disponible en esta dirección: <https://www.refworld.org/es/docid/598b4edd4.html> [Accesado el 27 Mayo 2020]

Molina-Prieto, L. F. (2017). Resiliencia a inundaciones: nuevo paradigma para el diseño urbano. *Revista de Arquitectura*, (December 2016), 82–94. <https://doi.org/10.14718/revarq.2016.18.2.8>

Morales-Cerdas, Vanessa, Piedra Castro, Lilliana, Romero Vargas, Marilyn, & Bermúdez Rojas, Tania.

(2018). Indicadores ambientales de áreas verdes urbanas para la gestión en dos ciudades de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1421-1435. <https://dx.doi.org/10.15517/rbt.v66i4.32258>

Nowak, D. J., Dwyer, J. F., & Childs, G. (1997). Los beneficios y costos del enverdecimiento urbano. *Áreas verdes urbanas en Latinoamérica y el Caribe*, 17-38.

ONU-Habitat. (s.f.). Ciudades Resilientes. Recuperado 2 agosto, 2019, de <http://www.onuhabitat.org.mx/index.php/ciudades-resilientes>

Pérez-Medina, S., & López-Falfán, I. (2015). Áreas verdes y arbolado en Mérida, Yucatán. *Hacia una sostenibilidad urbana. Economía, sociedad y territorio*, 15(47), 01-33.

Reyes Pácke, S., & Figueroa Aldunce, I. M. (2010). Distribución, superficie y accesibilidad de las áreas verdes en Santiago de Chile. *EURE (Santiago)*, 36(109), 89-110.

Rodríguez Laredo, D. (2015). La gestión del verde urbano como un criterio de mitigación y adaptación al cambio climático. XXXIV Encuentro Arquisur 2015 y XIX Congreso de Escuelas y Facultades Públicas de Arquitectura de los países de América del Sur (La Plata, 2015).

Rueda, S., De Cáceres, R., Cuchí, A., & Brau, L. (2012). El urbanismo ecológico. *Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, Barcelona*, 18-20.

Sánchez Cohen, I. (2011). Elementos para entender el cambio climático y sus impactos (No. 577.22 577.22 E4 ELE).

SEGOB, SEDATU, SNPC, & ONU-HABITAT. (2016). *Guía de Resiliencia Urbana 2016*. Sedatu, 1–57. <https://doi.org/Organización de las Naciones Unidas para los asentamientos humanos>

Sorensen, M. G., Keipi, K. J., Barzetti, V., & Williams, J. (1998). Manejo de las áreas verdes urbanas (No. 333.78 M274). *Inter-American Development Bank, Sustainable Development Department, Environment Division*.

UN (2018). *Ciudades - Desarrollo Sostenible. Agenda 2030, Objetivos de Desarrollo Sostenible*, p. 1. Retrieved

from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>

Valarezo, S., Castillo, M. & Alvarado, L. (2022). El verde urbano público: dotación, distribución y accesibilidad. Caso de estudio Loja, Ecuador. PENSUM. 8. 55. 10.59047/2469.0724.v8.n8.34668.

Varela, A. (12 de enero de 2018). Situación actual de áreas verdes en Culiacán. Blog Parques Alegres. <https://parquesalegres.org/biblioteca/blog/situacion-actual-de-areas-verdes-en-culiacan/>

Vásquez, A. E. (2016). Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile. Revista de Geografía Norte Grande, (63), 63-86.

WHO (2016). Urban green spaces and health. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2016. Recuperado de https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/321971/Urban-green-spaces-and-health-review-evidence.pdf

Mortero polimérico elaborado con resina híbrida de poliéster insaturado (a partir de reciclaje de botellas de PET post-consumo) con nanoacoplante silano

Polymeric mortar made with unsaturated polyester hybrid resin (from post-consumer PET bottle recycling) with silane nanocoupling

A. Bórquez-Mendivil¹, J.A. Verdugo-Sánchez¹, A. Hurtado-Macías², J.E. Leal-Pérez¹, R.A. Vargas Ortíz¹, J. Flores-Valenzuela¹, F.G. Cabrera-Covarrubias¹, B.A. García-Grajeda¹, J.L. Almaral-Sánchez^{1*}

RESUMEN

Botellas de PET post-consumo fueron recicladas mecánica y químicamente, para sintetizar resina híbrida de poliéster insaturado (RPI-H), con la adición de nanoacoplante silano (AS), utilizadas en la elaboración de morteros poliméricos (MP), que son una mezcla de agregados finos y polímero (aglutinante). La RPI-H es el aglutinante y el AS mejora la interacción química RPI-H/agregado. Se elaboró MP modificado con AS (MPM); la RPI-H fue sintetizada en reactor tipo Vessel, con variación de temperatura ambiente a 180 °C, con adición de propilenglicol, acetato de zinc, anhídrido maleico y estireno y 3-(trimetoxisilil)propil metacrilato (TMSPM), como AS. Se obtuvo el MPM y se caracterizó mediante espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) y resistencia a compresión. Los resultados obtenidos confirmaron la obtención de MPM y la interacción química RPI-H /agregado de los MPM, comprobado por FT-IR y la resistencia a compresión del MPM se incrementó en 45% respecto a la del MP.

Recibido: diciembre 2022
Aceptado: mayo 2023
Publicado: diciembre 2023

ABSTRACT

Post-consumer PET bottles were mechanically and chemically recycled to synthesize unsaturated polyester hybrid resin (RPI-H), with the addition of silane nanocoupling (AS), used in the preparation of polymeric mortars (PM), which are a mixture of fine aggregates and polymer (binder). The RPI-H is the binder and the AS enhances the RPI-H/aggregate chemical interaction. AS-modified MP (PMM) was made; RPI-H was synthesized in a Vessel-type reactor, varying the temperature from room temperature to 180 °C, with the addition of propylene glycol, zinc acetate, maleic anhydride and styrene and 3-(trimethoxysilyl)propyl methacrylate (TMSPM), as AS. PMM was obtained and characterized by Fourier transform infrared spectrometry (FT-IR) and compressive strength. The results obtained confirmed that the PMM was obtained and the chemical interaction in the ZTI of the PMM was achieved through the coupling agent TMSPM, due to its characteristic molecular bonds found (FT-IR) and the compressive strength of the PMM increased in 45% compared to that of the PM.

Palabras Clave:

Mortero polimérico modificado, acoplante silano, 3-(Trimetoxisilil)propil metacrilato, resina de poliéster insaturado, reciclaje de PET.

Keywords:

Coupling-modified polymeric mortar, silane coupling agent, 3-(trimethoxysilyl)propyl methacrylate, unsaturated polyester resin, PET recycling.

1. INTRODUCCIÓN

El tereftalato de polietileno (PET) es procesado por dos tipos de reciclaje, en el siguiente orden: 1) Reciclaje mecánico, que consiste en recolección, clasificación, verificación, trituración, lavado y eliminación de impurezas de botellas

*Autor para correspondencia.

Dirección de correo electrónico: jalmaral@uas.edu.mx.

¹Universidad Autónoma de Sinaloa. Gral. Ángel Flores S/N, Fracc. Las Fuentes, Los Mochis, Sin., C.P. 81223, México.

²Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C., Miguel de Cervantes #120, Complejo Industrial Chihuahua, Chihuahua, Chihuahua, 31136, México.

de PET, para reducirlas a hojuelas [1]. 2) Reciclaje químico, se refiere a la degradación de estas hojuelas al mínimo peso molecular, mediante el proceso de glicólisis, que es uno de los más comunes [2–4], donde el PET reacciona con glicoles y un catalizador por transesterificación para producir oligómeros tereftálicos de bajo peso molecular, que reaccionan con anhídrido maléico u otros ácidos dibásicos y con monómeros vinílicos, para sintetizar resina de poliéster insaturada (RPI) [5-10], la cual presenta mayor dureza y resistencia a la tensión cuando se utiliza el propilenglicol (PG) que al emplear etilenglicol en su síntesis [5]. La RPI tiene distintas aplicaciones, dentro de las que se destaca su uso como aglutinante en la elaboración de concretos y morteros poliméricos (MP) [11].

Los MP son materiales compuestos elaborados a partir de un polímero (aglutinante) y rellenos inorgánicos (agregado fino) [12]. Sus propiedades dependen del contenido de aglutinante, granulometría del agregado, naturaleza, contenido del relleno adicional, tipo de agente reductor de contracción utilizado y condiciones de polimerizado, entre otros [13]. Generalmente, la zona de transición interfacial es su parte más débil, pero es muy importante en la determinación de sus propiedades mecánicas [14]. Los efectos adhesivos interfaciales surgen de la unión de grupos orgánicos a la superficie de la fase inorgánica, a través de un agente de acoplamiento, que puede mejorar las propiedades mecánicas del mortero polimérico, por lo que su elección es muy importante [13]. Los agentes de acoplamiento de silano tienen la capacidad de formar enlaces entre moléculas orgánicas e inorgánicas, además de modificar químicamente las superficies, para combinar sus propiedades físicas o químicas [15]. El acoplante permite la interacción química, por medio de la formación de enlaces débiles o fuertes entre sus cadenas orgánicas y las del polímero orgánico, donde el número de sitios de acoplamiento y su localización son también uno de los parámetros más importantes para la unión química entre el agente acoplante y la fase inorgánica [16, 17]. El mecanismo de acoplamiento dirige a un enlace fuerte resultante entre las dos fases y se produce y propaga una fractura dentro del polímero, en contraste al no incluir acoplante, la fractura es usualmente iniciada y propagada a través de las fallas en las interfaces débiles de partículas orgánicas-inorgánicas [14].

En la Figura 1, se presenta la estructura química general de un agente de acoplamiento de silano que muestra dos clases de grupos funcionales, donde X es

un grupo hidrolizable (típicamente alcoxi, aciloxi, halógeno o amina) y el grupo R es un radical orgánico no hidrolizable que puede poseer una funcionalidad que imparte las características deseadas para el material híbrido final [18].

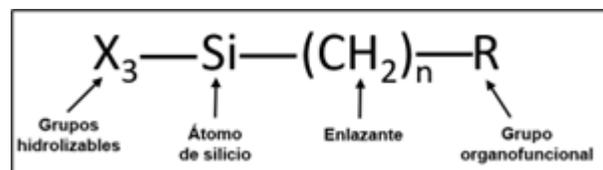


Figura 1. Estructura química general de los agentes acoplantes de tipo silano.

Se elaboraron composites híbridos de RPI reforzada con nanosílice tratada con diferentes agentes acoplantes (aminopropil-trietoxisilano, vinil-trietoxisilano y γ -cloro-propil trimetoxisilano) [19] y con polvo de sílice, acoplados con viniltrialiloxisilano [20], en ambos casos se mejoró la fuerza del enlace químico entre sus interfases e incrementaron sus propiedades mecánicas. El agente acoplante 3-aminopropiltriethoxisilano se utilizó en la elaboración del concreto cementicio para modificar superficialmente los agregados gruesos de coral y mejorar la adherencia interfacial entre la fase orgánica (agregado de coral) y la inorgánica (pasta de mortero cementicio), con lo cual se incrementó 35 % su resistencia a la compresión [21].

Concretos poliméricos de RPI han incrementado su resistencia a la compresión de 13 y 23.5 % al utilizar acoplantes 3-aminopropiltriethoxisilano y 7-metacriloxipropiltrimetoxisilano, respectivamente [22] y de resina epóxica, el 36 %, con TMSPM [23]. Morteros poliméricos fueron fabricados con los siguientes sistemas aglutinante-acoplante: fenol-formaldehído-aminopropiltriethoxisilano [24], resina de vinil éster- metilacriloxipropiltrimetoxisilano [25] y RPI-trimetoxisililvinilbencilamina [26], los cuales incrementaron su resistencia a compresión en 18, 15 y 36 %, respectivamente. comparadas contra el mortero polimérico convencional.

En revisión exhaustiva de la literatura, no se encontraron trabajos referentes a la implementación de RPI reciclada a partir de PET modificada con acoplante para uso en morteros poliméricos. En este trabajo

se estudió el mortero polimérico elaborado con resina de poliéster insaturado (a partir de reciclaje de botellas de PET post-consumo) adicionada con nanoacoplante silano.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

En el reciclaje mecánico se usaron botellas de PET, hidróxido de sodio (NaOH) y agua destilada. En la síntesis de bis(2-hidroxipropil) tereftalato (BHPT) se utilizaron hojuelas de PET, propilenglicol (PG) como solvente en la despolimerización y acetato de zinc (AZn) como catalizador, ambos marca Sigma-Aldrich con pureza mayor a 95%. En la síntesis de poliéster insaturado (PI), se emplearon BHPT (previamente sintetizado) y anhídrido maleico (AM), que proporciona insaturaciones, marca Sigma-Aldrich con pureza mayor a 95%. En la síntesis de RPI, se utilizaron PI (sintetizado previamente), estireno (St), como solvente reactivo, NaOH como desinhibidor y peróxido de benzoilo (PBO), como iniciador, todos marca Sigma-Aldrich con pureza mayor a 95%. En la hidrólisis del TMSPM, los reactivos empleados fueron TMSPM, etanol (EtOH), agua destilada y NaOH como desinhibidor, todos marca Sigma-Aldrich con pureza mayor a 95%. En la elaboración de morteros poliméricos con acoplante se empleó agregado fino (AF) de la región, RPI y TMSPM hidrolizado.

2.2. Equipo

2.2.1. Reciclaje mecánico para la obtención de hojuelas de PET y reciclaje químico para la despolimerización de PET y síntesis de PI y RPI.

Para la obtención de hojuelas de PET se utilizó un molino triturador, sin marca y para el reciclaje químico (despolimerización de PET y síntesis de PI y RPI), un reactor tipo Vessel, modelo CEIMX-020110606-GLOBE y horno de secado, marca Controls para polimerización de muestras.

2.2.2. Identificación de enlaces moleculares por FT-IR

Para identificar los enlaces moleculares de las muestras, se empleó un equipo Nicolet iS50 con accesorio para transmisión y reflectancia total atenuada. La preparación de las muestras consistió en condensarlas a 120 °C por 24 h en un horno de secado, ense-

guida se trituraron con mortero de ágata, para obtener una pequeña fracción pulverizada, después se depositaron en una superficie de diamante y fueron analizadas en el intervalo de medición de 4000 a 400 cm^{-1} .

2.2.3. Resistencia a compresión

Para determinar la resistencia a compresión de los MP y MPM se llevaron a cabo ensayos en una prensa universal marca INSTRON modelo 600DX, conforme a las especificaciones que establece la norma ASTM C109/C109M-02. La velocidad de carga empleada fue de 1200 N/s.

2.3 Desarrollo del experimento

2.3.1. Reciclaje mecánico de botellas de PET post-consumo

Las botellas de PET post-consumo fueron recicladas mecánicamente con un molino triturador para obtener hojuelas de tamaño máximo de 1 cm, las cuales fueron lavadas en solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH) al 10% y agua destilada (en tres repeticiones) para eliminar impurezas y después secadas en horno a 50 °C por 24 h.

2.3.2. Reciclaje químico parcial de botellas de PET post-consumo

Las hojuelas de PET, obtenidas en el reciclaje mecánico, fueron sometidas a un parcial reciclaje químico (por glicólisis) para obtener por despolimerización del PET, el bis(2-hidroxipropilo) (BHPT). Ésta síntesis se llevó a cabo en un reactor Vessel, al cual se le depositaron hojuelas de PET con adición de PG (75 % en peso de PET) y después se añadió AZn al 3 % en peso de PET como catalizador, enseguida se procedió a mezclar los tres componentes en el reactor por agitación, con rampas de temperatura de 20 °C hasta alcanzar 180 °C y permaneció la reacción por 3 h, una vez transcurrido este tiempo se sintetizó el BHPT, se enfrió hasta temperatura ambiente y se almacenó para utilizarse posteriormente como materia prima en la síntesis del poliéster insaturado.

2.3.3 Síntesis de poliéster insaturado

El poliéster insaturado (PI) se sintetizó mediante la mezcla de BHPT y AM al 17 % en peso de BHPT, en el reactor Vessel, bajo las mismas condiciones experimentales de la síntesis del BHPT.

2.3.4 Síntesis de resina de poliéster insaturado

Para sintetizar la RPI se mezcló el PI con estireno, al 30 % en peso de PI y PBO como iniciador, al 1% en peso de PI-St, por 30 min y se obtuvo RPI pre-polimerizada.

2.3.5 Hidrólisis de agente acoplante (TMSPM)

La hidrólisis del TMSPM, consistió en mezclar este reactivo con EtOH y H₂O, al 50 y 25% vol. de TMSPM, respectivamente, y finalmente se agitó durante 30 min. a temperatura ambiente.

2.3.6 Síntesis de RPI híbrida (RPI-H)

La síntesis de RPI-H, consistió en mezclar RPI y TMSPM al 5% en peso de RPI durante 30 min. a temperatura ambiente.

2.3.7 Elaboración de especímenes de mortero polimérico convencional (MP) y modificado (MPM)

Los especímenes de mortero polimérico y mortero polimérico modificado se elaboraron como se describe a continuación; el agregado fino al 80% vol. total de la muestra para cada MP y MPM, se mezcló con RPI pre-polimerizada al 20% vol. total de la muestra y RPI-H al 20 % vol. total de la muestra, para obtener mortero polimérico y mortero polimérico modificado, respectivamente. Especímenes cúbicos de 5 cm por lado fueron elaborados conforme a lo establecido en la norma ASTM C109/C109M-05. Posteriormente, se polimerizaron a 120 °C por 24 h, en horno con circulación de aire.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

3.1.1. Formación de RPI

En la Figura 2 se presentan los espectros FT-IR de PET, BHPT, PI, St y RPI, que se desplazaron arbitrariamente a lo largo del eje de transmitancia y en la Tabla 1, la información de las bandas identificadas correspondientes a sus enlaces característicos [27]. En la figura referida se observa que el espectro del BHPT presenta un cambio con respecto al del PET, que consiste en la aparición de una banda amplia a 3350 cm⁻¹ atribuido a la presencia de grupos OH y mayor intensidad en las bandas 2972, 2936, 2877 cm⁻¹, correspondiente a los grupos CH₃, CH₂ y CH, lo cual indica que se llevó a cabo la despolimerización del PET por glicólisis, por medio de la transesterifica-

ción entre el grupo saliente (-OCH₂CH₂-) del PET y el grupo entrante (-CH₃CH(OH)CH₂O-) del PG. En el espectro del PI, se observa la incorporación de una banda a 1643 cm⁻¹, atribuida al enlace C=C (señalada con la ampliación), esto confirma la policondensación entre el BHPT y el AM, este último proporciona las insaturaciones detectadas [28-34]. En el espectro del St se presenta una banda en 1601 cm⁻¹, (señalada con la ampliación), de estiramiento del C=C que representa sus sitios de insaturación. En el espectro de RPI no se observan bandas en la región de 1600 a 1643 cm⁻¹, correspondientes a sitios de insaturación que aparecen, tanto en PI como en St, lo cual confirma que ocurrió el entrecruzamiento entre estos dos polímeros para la formación de RPI.

3.1.2. Formación de RPI-H

En la Figura 3 se presentan los espectros FT-IR de la RPI-H y sus precursores (PI, St y TMSPM), que se desplazaron arbitrariamente a lo largo del eje de transmitancia y en la Tabla 2, las bandas de sus enlaces característicos [27]. En la figura referida, es importante destacar que el PI, St y TMSPM presentan una banda a 1643, 1601 y 1640 cm⁻¹, respectivamente (señaladas con las ampliaciones respectivas), atribuidas a la presencia de enlaces C=C, [28-30, 33] que son sus sitios de insaturación. En el espectro de RPI-H no se observan bandas en la región de 1600 a 1643 cm⁻¹ (señalada con la ampliación), correspondientes a sitios de insaturación que aparecen, tanto en PI, St y TMSPM, lo cual confirma que ocurrió el entrecruzamiento entre los tres precursores para la formación de RPI-H. Además de la identificación de las bandas atribuidas a los grupos inorgánicos del TMSPM, a 3507 cm⁻¹, correspondiente a enlaces Si-OH, producto de su hidrolización y enlaces Si-O-Si a 1099 cm⁻¹, producto de la condensación de los grupos silanoles (Si-OH) formados [35-39]. Por lo tanto, esto nos indica la formación exitosa de la RPI-H.

3.1.3. Propuesta de mecanismo de reacción del MPM

En la Figura 4, con base en los análisis de espectroscopía por infrarrojo anteriores, se propone el mecanismo de reacción del MPM, se presenta la propuesta de la formación del mortero polimérico elaborado con RPI de PET reciclado y nanoacoplante organo(alcoxi)silano, TMSPM. En a) se observa la superficie del AF la cual presenta grupos OH, en b), el acoplante TMSPM hidrolizado, en c), la RPI pre-polimerizada y

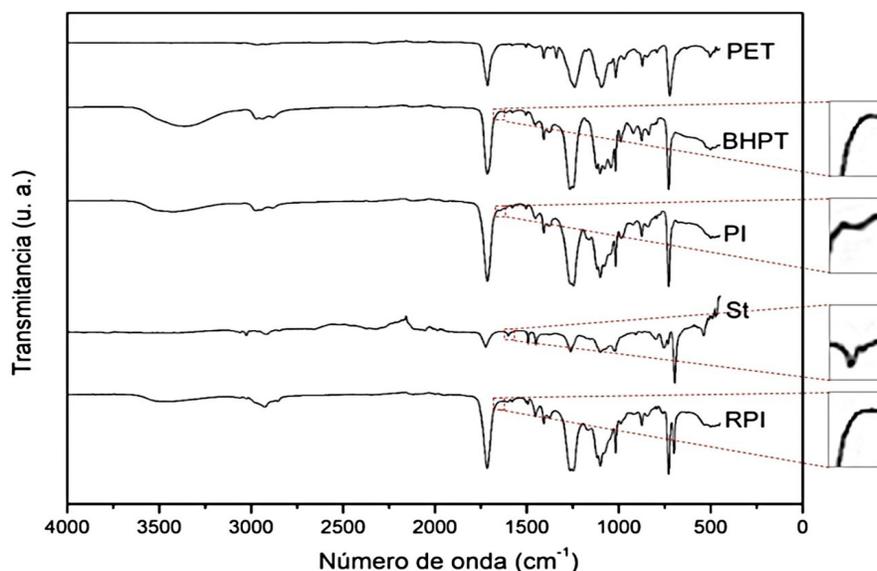


Figura 2. Espectros FT-IR del PET, BHPT, PI, St y RPI.

Tabla 1. Información de las bandas del PET, BHPT, PI, St y RPI.

Enlace	Número de onda (cm-1)					Tipo de vibración
	PET	BHPT	PI	St	RPI	
C-O	1240	1265	1263	-	1263	Estiramiento
C=O	1713	1716	1715	-	1716	Estiramiento
C=C	-	-	1643	1601	-	Estiramiento
C=Carom	1504	1504	1504	1493	1504	Estiramiento
CHarom	872-723	876-727	875-726	795-695	876-699	Flexión fuera del plano
CH3	-	2972	2975	-	2977	Estiramiento simétrico
CH2	2918	2936	2944	2918	2954	Estiramiento asimétrico
CH	-	2877	2881	2844	2852	Estiramiento simétrico
OH	-	3350	-	-	-	Estiramiento

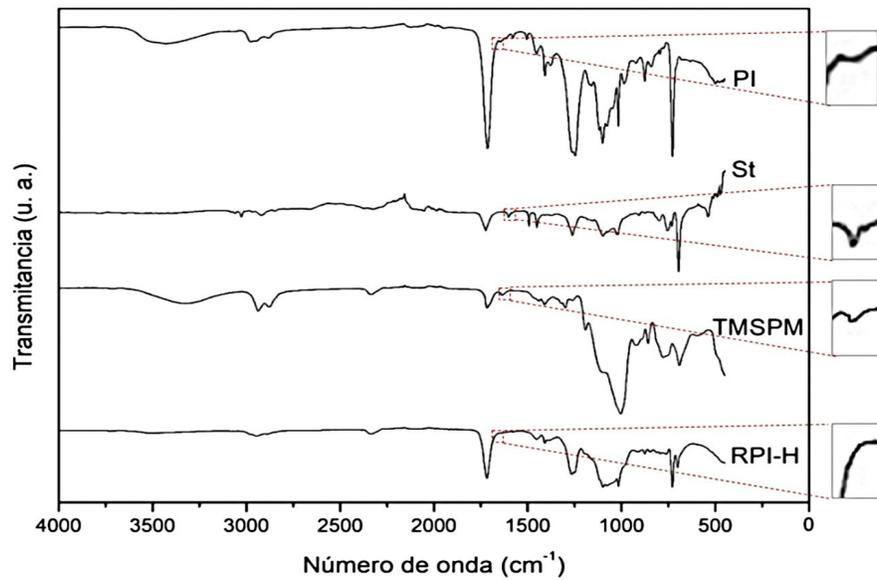


Figura 3. Espectros FT-IR de la RPI-H y sus precursores (PI, St y TMSPM).

Tabla 2. Información de las bandas de la RPI-H y sus precursores (PI, St y TMSPM).

Enlace	Número de onda				Tipo de vibración
	PI	St	TMSPM	RPI-H	
C-O	1263	-	1298	1265	Estiramiento
C=O	1715	-	1714	1716	Estiramiento
C=C	1643	1601	1640	-	Estiramiento
C=Carom.	1504	1493	-	1452	Estiramiento
CHarom.	875-726	795-695	-	876-700	Flexión fuera del plano
CH ₃	2975	-	2936	2943	Estiramiento simétrico
CH ₂	2944	2918	2877	2888	Estiramiento asimétrico
CH	2881	2844	-	2842	Estiramiento simétrico
Si-C	-	-	1259	1195	Flexión simétrica
Si-O	-	-	1105	1115	Estiramiento asimétrico
Si-OH	-	-	3323	-	Estiramiento

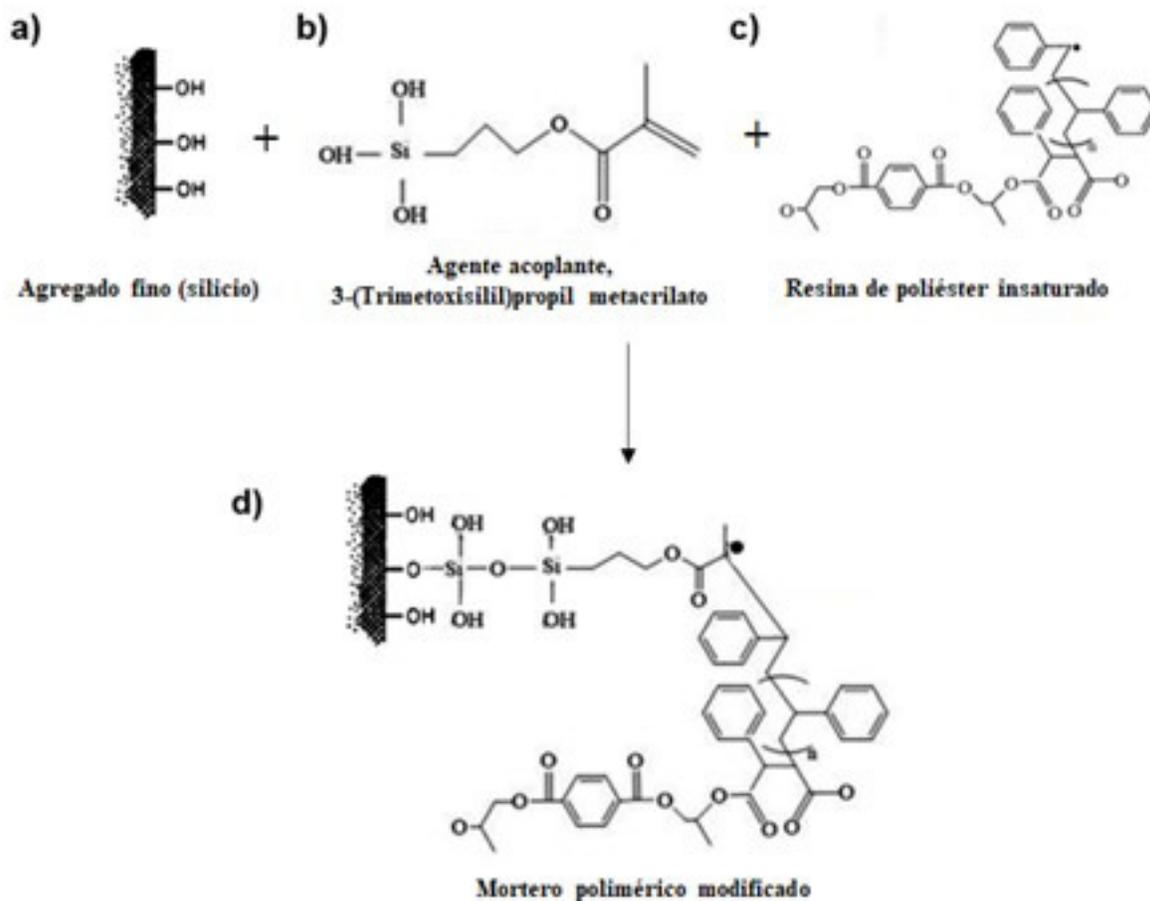


Figura 4. Propuesta de formación del MPM con AF-TMSPM-RPI

en d) la formación del mortero polimérico que se lleva a cabo, por un lado, por la policondensación entre los grupos hidroxilo (OH) del acoplante TMSPM (producto de la hidrolización de sus grupos alcoxi) y los del agregado fino para formar un enlace covalente (Si-O) entre ellos y por otro lado, ocurre la polimerización por radicales libres, reacción originada por el ataque de los radicales libres presentes en la RPI pre-polimerizada al grupo organo-funcional no hidrolizable del TMSPM (C=CH₂) [40, 41].

3.2. Propiedades físicas del AF

En la Figura 5 se presenta la curva granulométrica del AF, donde se muestran los límites superior e inferior según la norma ASTM C33/C33M-18, y se ob-

serva que cumple con los límites granulométricos establecidos, localizada muy cercana al límite superior.

En base a los datos de la curva granulométrica, se calculó el módulo de finura del AF, que resultó con valor de 2.3, el cual cumple con los límites recomendados (2.3 a 3.1) de la norma ASTM C33/C33M-18. Además, se obtuvo la densidad de AF, con un valor de 1.84 g/cm³, de acuerdo a la norma ASTM C128-15.

3.2. Resistencia a compresión

En la Figura 6 se presenta el diagrama de barras de la resistencia a compresión (F'c) de MPM y MP. Se observa que la F'c fue de 7.77 MPa para MPM y de 5.37 MPa para MP, por lo que, de acuerdo a la

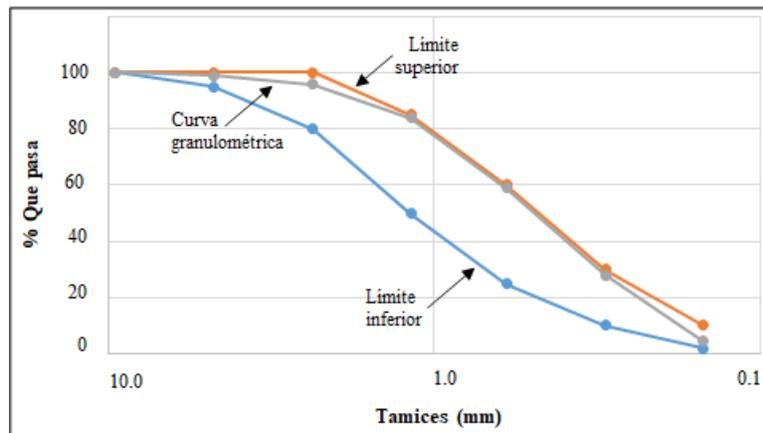


Figura 5. Curva granulométrica del AF

NMX-C-486-ONNCCE-20, estos morteros se clasifican como tipo II y tipo III, respectivamente.

El F_c del MPM incrementó 45 % con respecto al MP, esto se puede atribuir a la interacción química

entre el AF y la RPI por medio del agente acoplante silano, TMSPM, que pudiera proporcionar mayor rigidez, por el mejoramiento de la adhesión en toda su zona de transición interfacial [13, 21, 42].

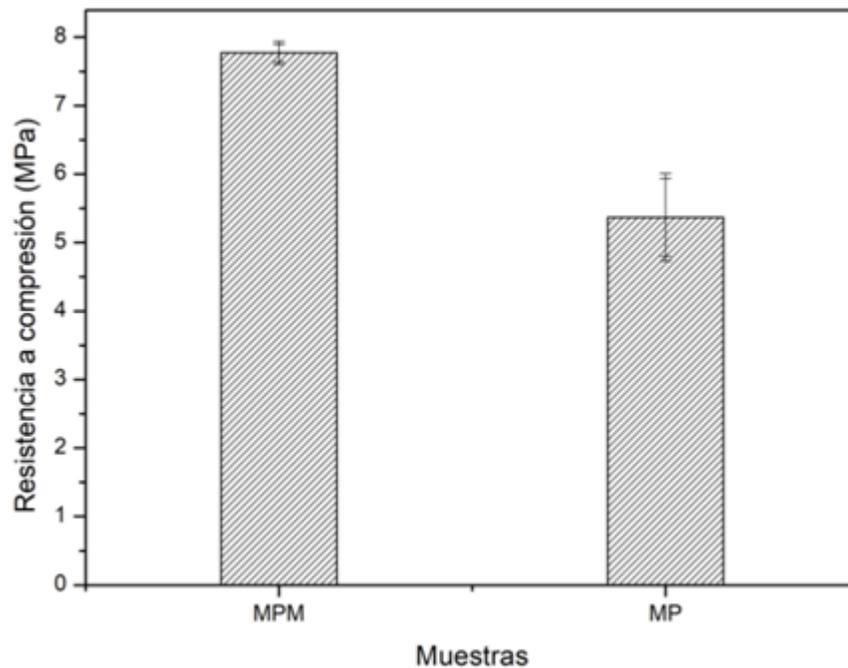


Figura 6. Diagrama de barras de la resistencia a compresión de MP y MPM

4. CONCLUSIONES

Se elaboró mortero polimérico modificado con agregado fino y resina de poliéster insaturado con adición de nanoacoplante silano TMSPM.

Se sintetizó la resina de poliéster insaturado, comprobado por el entrecruzamiento de las insaturaciones presentes en el poliéster insaturado y el estireno, en base a la síntesis del poliéster insaturado mediante la policondensación del BHPT con anhídrido maleico, en el cual se utilizó el BHPT, que fue sintetizado a partir del reciclaje químico de las hojuelas del PET (recicladas mecánicamente) con adición de propilenglicol, corroborado en cada etapa por medio del FT-IR.

Se sintetizó la resina de poliéster insaturado híbrida por medio de la interacción química entre las insaturaciones de la RPI pre-polimerizada y el grupo organo-funcional, $C=CH_2$, del agente acoplante silano, TMSPM, lo cual fue corroborado por FT-IR.

Se elaboró mortero polimérico, a partir de agregado fino/resina de poliéster insaturado, con relación 80%/20%, en peso, respectivamente y mortero polimérico modificado, a partir de agregado fino/resina de poliéster insaturado híbrida, con relación 80%/20%, en peso, respectivamente, donde la resina de poliéster insaturado híbrida contiene 5% de agente acoplante silano, TMSPM.

Se propuso un mecanismo de reacción para la elaboración del mortero polimérico modificado, donde se mostró la interacción del agente acoplante, TMSPM, tanto con el agregado fino, por medio de su grupo funcional inorgánico hidroxilo (OH) y con la resina de poliéster insaturado, por medio de su grupo funcional orgánico $C=CH_2$.

La resistencia a compresión del mortero polimérico modificado fue 45% mayor que la del mortero polimérico, debido a la interacción química entre el agregado fino y la resina de poliéster insaturado, por medio del agente acoplante silano, TMSPM, la cual pudo proporcionar mayor rigidez, por el mejoramiento de la adhesión en toda la zona de transición interfacial entre el agregado fino y la resina de poliéster insaturado, al proporcionar enlaces químicos entre los grupos inorgánicos del TMSPM y la superficie del agregado fino y entre los grupos organofuncionales del TMSPM y la resina de poliéster insaturado.

La resistencia a compresión de mortero polimérico modificado y mortero polimérico fue equivalente a la de los morteros cementicios tipo II y III de la NMX-C-486-ONNCE-20.

5. RECONOCIMIENTOS

Los autores otorgan reconocimiento al CONACYT por su apoyo en la beca No. 924109 y al personal del Centro de investigación en Materiales Avanzados, S.C., México, por la caracterización de muestras, especialmente al soporte técnico de R. P. Talamantes-Soto.

6. REFERENCIAS

- [1] A. Ravve, Principles of Polymer Chemistry, Niles, IL, USA: Springer Science+Business Media, LLC, 2012.
- [2] D. R. Askeland y P. P. Phulé, Ciencia e ingeniería de los materiales, Missouri: Thomson, 2004.
- [3] A. Kurmar y R. K. Gupta, Fundamentals of Polymer Engineering, Revised and Expanded, Kanpur, India: Marcel Dekker, Inc., 2003.
- [4] C. Artur, G. Barbara, P. Beata, G. Martav y P. Przemyslaw, Composites of unsaturated polyester resins with microcrystalline cellulose and its derivatives, Materials, vol. 13, n° 1, pp. 1-13, 2020.
- [5] P. Przemyslaw, P. Andrzej y G. Barbara, Green composites based on unsaturated polyester resin from recycled PET with wood flour as filler—synthesis, characterization and aging effect, Polymers, vol. 12, n° 12, pp. 1-11, 2020. [6] P. Daniel y S. Tadeusz, Chemical Recycling of Poly(ethylene terephthalate), Industrial and Engineering Chemistry Research, vol. 36, n° 4, pp. 1373-1383, 1997.
- [7] S. Thomas, A. Rane, K. Kanny, A. V.K. y M. George Thomas, Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles, Kerala, India: William Andrew, 2019.
- [8] A. Luis, N. Rendón y M. E. Korody, Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (PET) – cemento, Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, vol. 23, n° 1, pp. 1-16, 2008.
- [9] S. Vigneshwaran, D. Oisik, N. Rasoul Esmaeely, B. Karthik, S. Sunpreet, H. Mikael S., B. Filippo y R. Seeram, Polymer Recycling in Additive Manufacturing: An Opportunity for the Circular Economy, Materials Circular Economy, vol. 2, n° 1, pp. 1-11, 2020.

[10] J. Reis, R. Chianelli-Junior, J. Cardoso y F. Marinho, Effect of recycled PET in the fracture mechanics of polymer mortar, *Construction and Building Materials*, vol. 25, n° 6, pp. 2799-2804, 2011.

[11] Y. Gao, P. Romero, H. Zhang, M. Huang y F. Lai, Unsaturated polyester resin: A review, *Construction and Building Materials*, vol. 228, pp. 116709, 2016.[12] K. Rebeiz, D. Fowler y D. Paul, Polymer concrete and polymer mortar using resins based on recycled poly(ethylene terephthalate), *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 44, n° 9, pp. 1649-1655, 1992.

[13] A. Gupta, P. Mani y S. Krishnamoorthy, Interfacial adhesion in polyester resin concrete, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 3, n° 3, pp. 149-154, 1983.

[14] H. Akil, J. Lily, H. Razak y A. Zainal, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Effect of Various Coupling Agents on Properties of Alumina-filled PP Composites, vol. 25, n° 7, pp. 744-759, 2006.

[15] K. Mittal y D. O'Kane, Vapor deposited silanes and other coupling agents, *The Journal of Adhesion*, vol. 8, n° 1, pp. 93-97, 1976.

[16] B. Chmielewska y J. Sustersic, The influence of silane coupling agents on the polymer mortar, *Cement and Concrete Composites*, vol. 28, n° 9, pp. 803-810, 2006.

[17] M. Hussain, A. Nakahira, S. Nishijima y K. Niihara, Effects of coupling agents on the mechanical properties improvement of the TiO₂ reinforced epoxy system, *Elsevier Science B.V.*, vol. 26, pp. 299-303, 1996.

[18] Elsevier, Chapter 8 Chemical modification of silica: Applications and procedures, *Studies in Surface Science and Catalysis*, vol. 93, n° 8, pp. 149-192, 1995.

[19] W. Luo, X. Wang, R. Huang y P. Fang, Interface enhancement of glass fiber/ unsaturated polyester resin composites with nano-silica treated using silane coupling agent, *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, vol. 19, n° 1, pp. 34-40, 2014.

[20] S. Widad, Synthesis and polymerization of new silane coupling agent and used it as impact modifier of silica filled unsaturated polyester, *Asian Journal of Applied Sciences*, vol. 4, n° 2, pp. 370-378, 2016.

[21] L. Jinming, J. Boyu, Y. Qing, X. Wei, X. Haiying, D. Shanliang y Y. Wenshu, Properties of concrete prepared with silane coupling agent-impregnated coral aggregate and coral concrete, *Materials*, vol. 14, n° 21, pp. 1-15, 2021.

[22] P. Mani, A. Gupta y S. Krishnamoorthy, Efficiency of some silane coupling agents and of the method of their application in polyester resin concrete, *Journal of Materials Science*, vol. 18, n° 12, pp. 3599-3605, 1983.

[23] P. Mani, A. Gupta y S. Krishnamoorthy, Comparative Study of Epoxy and Polyester Resin-Based Polymer Concretes, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 7, n° 3, pp. 157-163, 1987.[24] R. Sood, S. Krishnamoorthy y B. Khandelwal, The effect of silane coupling agent and microfiller on the strength of phenol-formaldehyde resin concrete, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, vol. 6, n° 2, pp. 93-98, 1984.

[25] B. Chmielewska, L. Czarnecki, J. Sustersic y A. Zajc, The influence of silane coupling agents on the polymer mortar, *Cement and Concrete Composites*, vol. 28, n° 9, pp. 803-810, 2006.

[26] M. Ribeiro, A. Fiúza, A. Castro, F. Silva, M. Dinis, J. Meixedo y M. Alvim, Mix design process of polyester polymer mortars modified with recycled GFRP waste materials, *Composite Structures*, vol. 105, pp. 300-310, 2013.

[27] B. Stuart, *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons, Ltd, 2004.

[28] E. Rodriguez, The effect of free radical initiators and fillers on the cure of unsaturated polyester resins, *Polymer Engineering & Science*, vol. 31, n° 14, pp. 1022-1028, 1991.

[29] M. Carmen Matías, A. Larena, M. De La Ulagares Orden y J. Martinez, Application of FTIR spectroscopy to the study of curing of glass reinforced polyester composites, *Macromolecular Symposia*, vol. 94, n° 1, pp. 273-282, 1995.

[30] J. Grenet, S. Marais, M. T. Legras, P. Chevalier y J. M. Saiter, DSC and TSDC study of unsaturated polyester resin: Influence of the promoter content, *Journal of*

Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 61, n° 3, pp. 719-730, 2000.

[31] M. E. Tawfik, Preparation and characterization of water-extended polyester based on recycled poly(ethylene terephthalate), *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 89, n° 13, pp. 3693-3699, 2003.

[32] K. Suyama, M. Kubota, M. Shirai y H. Yoshida, Chemical recycling of networked polystyrene derivatives using subcritical water in the presence of an aminoalcohol, *Polymer Degradation and Stability*, vol. 95, n° 9, pp. 1588-1592, 2010.

[33] J. Purohit, G. Chawada, B. Choubisa, M. Patel y B. Dholakiya, Polyester Polyol Derived From Waste Poly (Ethylene Terephthalate) for Coating Application on Mild Steel Polyester Polyol Derived From Waste Poly (Ethylene Terephthalate) for Coating Application on Mild Steel, *Chemical sciences journal*, vol. 2012, n° CSJ-76, pp. 1-17, 2012.

[34] J. D. Rusmirović, K. T. Trifković, B. Bugarski, V. B. Pavlović, J. Džunuzović, M. Tomić y A. D. Marinković, High performance unsaturated polyester based nanocomposites: Effect of vinyl modified nanosilica on mechanical properties, *Express Polymer Letters*, vol. 10, n° 2, pp. 139-159, 2016.

[35] D. Soriano, A. Mazo, J. Rubio, F. Rubio y J. L. Oteo, Degradación térmica de nanocomposites TEOS/resol y γ -APS/resol, *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 45, n° 6, pp. 379-388, 2006.

[36] C. M. Zheng, X. D. Li, H. Wang, D. F. Zhao y T. J. Hu, Evolution of crystallization and its effects on properties during pyrolysis of Si-Al-C-(O) precursor fibers,

Journal of Materials Science, vol. 43, n° 9, pp. 3314-3319, 2008.

[37] N. A. Rangel-Vázquez y T. Leal-García, Spectroscopy analysis of chemical modification of cellulose fibers, *Journal of the Mexican Chemical Society*, vol. 54, n° 4, pp. 192-197, 2010.

[38] A. H. Mohammed, M. B. Ahmad, N. O. R. A. Ibrahim y N. Zainuddin, Synthesis and monomer reactivity ratios of [3(trimethoxysilyl) propyl methacrylate/N-vinyl pyrrolidone] copolymer, *International Journal of Chemical Sciences*, vol. 14, n° 4, pp. 2279-2291, 2016.

[39] R. Salgado-Delgado y A. Salgado-Delgado, Theoretical and experimental spectroscopic analysis by FTIR in the effect of the silanes on the chemical modification of the surface of rice husk, *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 6, n° 2, pp. 04-07, 2016.

[40] A.H. Mohammed, M.B. Ahmad, N.A. Ibrahim y N. Zainuddin, Effect of crosslinking concentration on properties of 3- (trimethoxysilyl) propyl methacrylate/N-vinyl pyrrolidone gels, *Chemistry Central Journal*, vol. 12, n° 15, 2018.

[41] X, Fan, S. Gu, L. Wu y L. Yang, Preparation and characterization of thermoresponsive poly(N-isopropylacrylamide) copolymers with enhanced hydrophilicity, *E-Polymers*, vol. 20, pp. 561-570, 2020.

[42] G. Li, Z. Wang, C.K.Y. Leung, S. Tang, J. Pan, W. Huang y E. Chen, Properties of rubberized concrete modified by using silane coupling agent and carboxylated SBR, *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, Part 1, pp. 797-807, 2016.

Análisis de propiedades mecánicas e instrumentación de maquina universal para ensayo de materiales metálicos

Analysis of mechanical properties and instrumentation of a universal machine for testing metallic materials

Omar Payán-Serrano^{1*}, Ismael Diaz-Peña¹, Brandon De La Cruz Nuñez², Fabrizzio Llanes-López².

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es estudiar la resistencia de algunos materiales metálicos disponibles en la región de Culiacán Sinaloa, utilizando una maquina universal para ensayos de pruebas destructivas y comparar los resultados con los esperados de acuerdo con las propiedades mecánicas descritas en las correspondientes fichas técnicas. Además, un proceso de instrumentación es planteado e implementado en la maquina universal con la finalidad de mejorar la experiencia de uso de profesores/estudiantes y extender el aprovechamiento de este tipo de equipo robusto y valioso. Finalmente, el estudio en relación con las propiedades mecánicas de los materiales mostró algunas diferencias con respecto a las esperadas y las mediciones electrónicas/digital obtenidas por parte del sistema de instrumentación adaptado brindó resultados cercanos a los descritos por el sistema mecánico/análogo.

Recibido: enero 2023
Aceptado: mayo 2023
Publicado: diciembre 2023

Palabras Clave:

Propiedades mecánicas; maquina universal, instrumentación.

Keywords:

Mechanical properties; universal machine, instrumentation

ABSTRACT

The aim of this work is to study the resistance of some metallic materials available in the region of Sinaloa, using a universal machine for destructive tests and to compare the results with those expected according to the mechanical properties described in the corresponding technical data sheets. In addition, an instrumentation process is proposed and implemented in the universal machine to improve the user experience of teachers/students and extend the use of this type of robust and valuable equipment. Finally, the study in relation to the mechanical properties of the materials showed some differences with respect to the expected ones and the electronic/digital measurements obtained by the adapted instrumentation system provided close results to those described by the mechanical/analog system.

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades mecánicas determinan el comportamiento del material cuando es sometido a esfuerzos o tratamientos mecánicos externos y cambios de temperatura [1, 2, 3]. El conocimiento de estas propiedades permite que la selección del material para el diseño, fabricación de piezas y conjuntos mecánicos sea una tarea más objetiva [4, 5]. Por tal motivo para la mayoría de las aplicaciones las propiedades mecánicas son consideradas de gran importancia; principalmente en el tema de diseño y construcción de obras civiles [6, 7].

*Autor para correspondencia.

Dirección de correo electrónico: omar.ps@culiacan.tecnm.mx

¹ Profesor del Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán

² Estudiante de Licenciatura de Ingeniería Mecatrónica del Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán

La gran mayoría de la maquinaria y obras civiles se elaboran utilizando materia prima que se encuentran en la región de desarrollo. Por lo tanto, es importante tener un adecuado seguimiento de la calidad de estos materiales para conseguir realmente el desempeño y la seguridad que fue proyectada desde la etapa de diseño. Además, muchos de los catálogos de materiales de construcción cuentan con poca o nula información técnica que ayude a los diseñadores a considerar adecuadamente las propiedades mecánicas de estos materiales en sus proyectos.

Lamentablemente, la calidad de las piezas de mampostería disponibles en la ciudad de México y sus alrededores vino a la baja en décadas recientes [1, 8]. Por esta razón, en años recientes varias entidades de la República han estado trabajando en la obtención experimental de las propiedades mecánicas de las mamposterías locales [9, 10, 11].

En lo referente a materiales metálicos, existe poca evidencia de estudios realizados por laboratorios de universidades [12, 13]. Esto se debe principalmente a que los fabricantes de este tipo de materiales por lo general son grandes empresas que cuentan con los recursos necesarios para mantener procesos de control de calidad. Sin embargo, es importante avalar la información expuesta en los catálogos de los fabricantes a partir de resultados experimentales por parte de laboratorios neutrales como lo pueden llegar a ser las universidades. Por lo tanto, para este tipo de estudios experimentales es relevante contar con un adecuado equipo de pruebas destructivas, el cual disponga de un sistema electrónico robusto y preciso para la adquisición de datos con la finalidad de expandir el análisis de resultados utilizando procesamiento computacional.

2. MAQUINA UNIVERSAL PARA PRUEBAS MECÁNICAS

Un equipo fundamental para realizar la medición de las propiedades mecánicas es la máquina universal [14]. Debido al año de fabricación, muchas de las máquinas universales disponibles en universidades son poco modernas y carecen de la presentación de resultados en formato digital. Sin embargo, toda máquina universal está compuesta principalmente de dos secciones esenciales: una para pruebas (compresión y tensión principalmente) y otra para controlar y observar la fuerza aplicada (Figura 1) [15].



Figura 1. Sección de mando y prueba de una máquina universal hidráulica con capacidad de 50 toneladas marca italiana Galdabini.

Dependiendo del rango de la fuerza aplicada a las probetas, las máquinas universales se clasifican en hidráulicas y electromecánicas. Las máquinas electromecánicas pueden aplicar hasta una fuerza de 600 kN (1.35×10^5 lb), mientras que las máquinas hidráulicas permiten aplicar fuerzas de hasta 4500 kN (10.1×10^5 lbf) [16].

En la Figura 2 se muestran las partes principales de la sección de mando de la máquina universal. Las agujas dinamométricas describen visualmente la fuerza en desarrollo y la fuerza máxima alcanzada durante la prueba; los volantes de mando permiten ajustar la carga máxima o de control e iniciar o detener el proceso de aplicación de la fuerza en la probeta o espécimen de prueba. Finalmente, el graficador mecánico dibuja físicamente en papel, mediante un rodillo giratorio, una curva escalada a dos ejes que representa la fuerza y el desplazamiento generados durante la prueba. La Figura 3 muestra una curva dibujada por la graficadora mecánica, donde se puede observar sutilmente las zonas típicas del comportamiento del acero a tensión, donde el eje horizontal de la gráfica describe el desplazamiento o deformación de la probeta y el eje vertical la fuerza aplicada durante el proceso de una prueba destructiva. Sin embargo, en la actualidad la presentación de resultados en formato de impresión física implica una experiencia poco atractiva e impráctica para el tema de procesamiento computacional de los datos. Por tal motivo, la adaptación de un sistema digital para la adquisición de datos puede resultar una

mejora de la experiencia de uso y de la precisión de la información.

3. SISTEMA ELECTRÓNICO/DIGITAL PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS

Hoy en día existen una aceptable variedad de sistemas electrónicos de libre uso y configuración (Figura 4), conocidos como placas de desarrollo. Las placas de desarrollo son dispositivos que cuenta con un microcontrolador (microchip) reprogramable, el cual, puede ejecutar instrucciones para un fin específico [17, 18 y 19]. Generalmente estas placas cuentan con entradas y salidas análogas y/o digitales para permitir la comunicación con sensores externos, haciendo uso de la electrónica digital. Además, en el mercado hay una gran disponibilidad de transductores del tipo sensor (Figura 5), los cuales permiten transformar o convertir una determinada manifestación física en una salida de información legible por un sistema electrónico como lo pueden ser las tarjetas de desarrollo anteriormente planteadas.



Figura 2. Elementos de la sección de mando de la máquina universal.

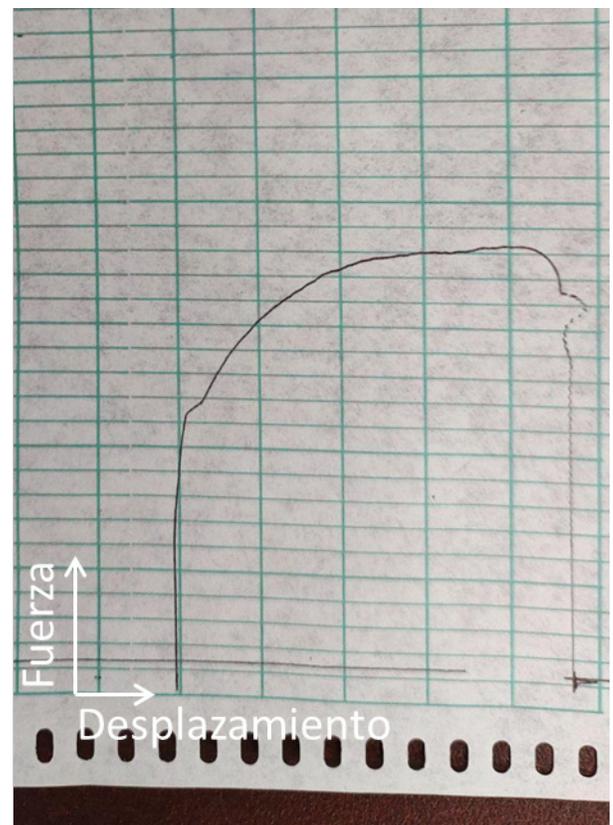


Figura 3. Curva dibujada por la graficadora mecánica incorporada originalmente en la máquina universal.

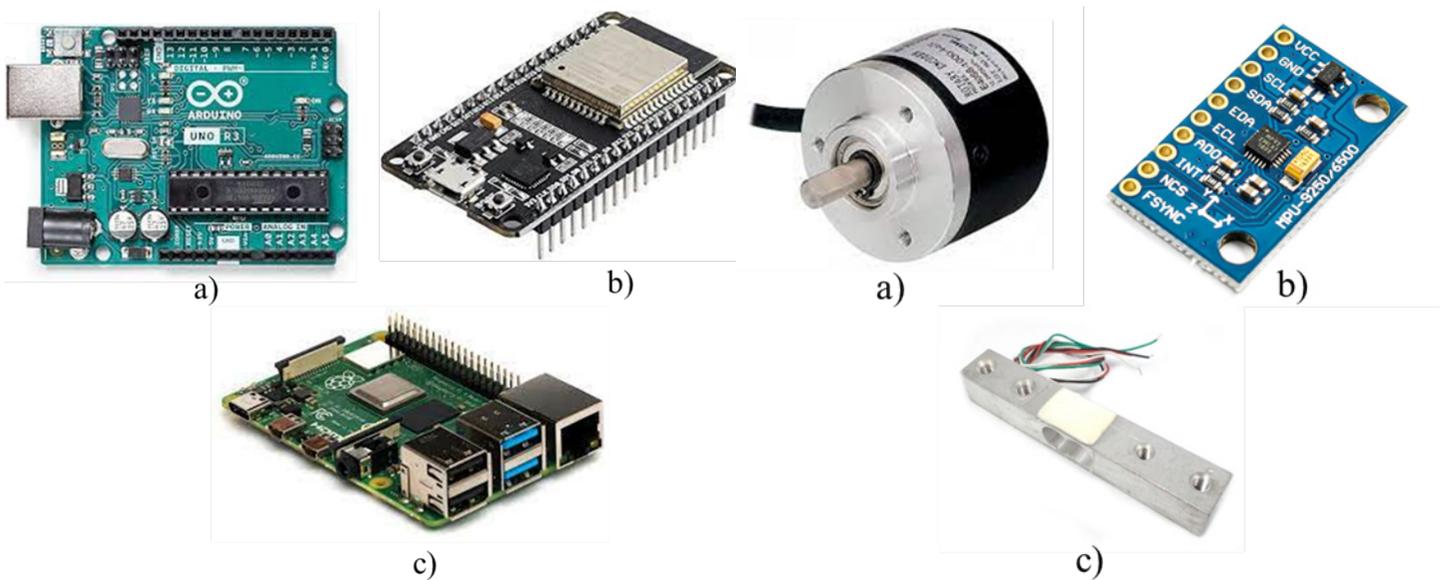


Figura 4. Placas electrónicas de desarrollo. a) Arduino UNO. b) ESP32. c) Raspberry PI.

Dentro del gran universo de sensores disponibles, en la Figura 5 se muestran algunos de los más utilizados. La celda de carga convierte la fuerza en una salida eléctrica medible; este tipo de transductor ofrece una relación directa con una de las variables de interés, la fuerza. Las celdas de cargas suelen ser económicamente accesibles para pequeñas capacidades, sin embargo, su valor incrementa drásticamente para aplicaciones donde se aplican elevadas cargas. El módulo MPU9250 es una unidad de medición económica con 3 sensores basados en sistemas microelectromecánicos, los cuales permiten medir la velocidad de giro en 3 ejes (giroscopio), la aceleración de desplazamiento en 3 ejes (acelerómetro) y un magnetómetro para definir la dirección en 3 ejes con respecto al norte polar. Este módulo ofrece una gran versatilidad debido a que es posible procesar la información de los 3 sensores y calcular parámetros como desplazamiento, orientación, velocidad, aceleración, posición, etc. Sin embargo, debido a que utiliza microelementos-electromecánicos, las altas vibraciones y los fuertes campos magnéticos cercanos al dispositivo generan ruido significativo en sus señales de salida. Una alternativa altamente robusta es el transductor conocido como encoder, codificador o generador de pulsos [20]. El encoder suele ser un dispositivo elec-

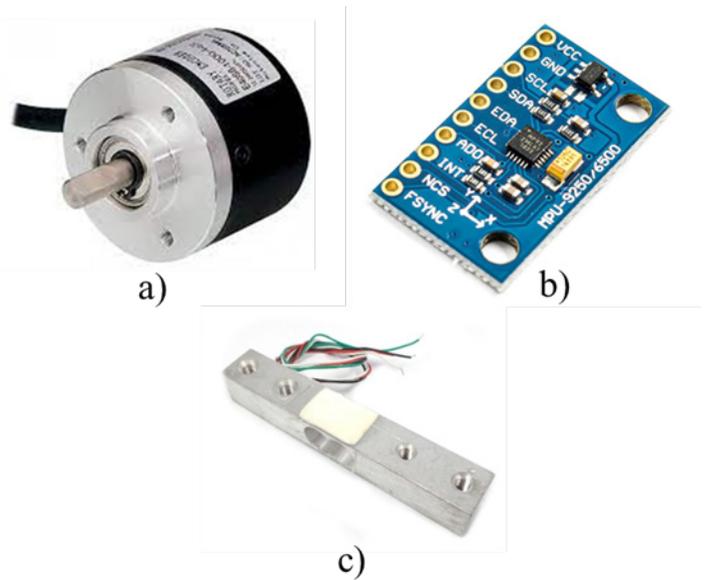


Figura 5. Transductores tipo sensor. a) Encoder. b) Módulo MPU9250. c) Celda de carga.

tromecánico usado para medir la posición angular de un eje al describirla mediante un código digital, por lo tanto, es un dispositivo menos susceptible al ruido externo generado por vibración o campos magnéticos. Sin embargo, este tipo de sensor no ofrece de manera directa la medición de las variables de interés fuerza y desplazamiento. Es por este motivo que se requiere de adaptaciones mecánicas y procesamiento matemático para convertir y relacionar la posición angular en desplazamiento o fuerza.

En la Figura 6 se muestra de manera general el proceso para la adquisición de datos digitales. El sensor o los sensores envían la información digital a una placa de desarrollo, la cual interpreta pulsos eléctricos de acuerdo con su código de programación y posteriormente se comunica a una computadora con la finalidad de un mayor procesamiento y/o presentación visual de la información. Para la implementación de los elementos del sistema de adquisición de datos se analizó y estudió el principio de funcionamiento de todos los sistemas (eléctrico, mecánico e hidráulico) con apoyo del manual e inspección visual de la dinámica de los componentes. Se observó que el giro del rodillo es generado por el movimiento de una cuerda, la cual esta conectada a la viga móvil de la sección de pruebas (Figura 7 y 8). Esta viga móvil tiene relación directa

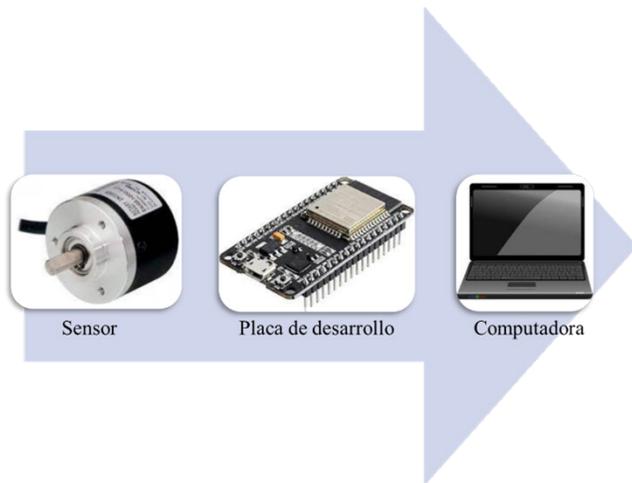


Figura 6. Proceso general para la adquisición de datos digitales.

con los desplazamientos generados en las pruebas de tensión o compresión y con la rotación del rodillo. Por otra parte, la varilla dinamométrica mostrada en la Figura 6b desarrolla un movimiento horizontal y está relacionado con la aguja dinamométrica mediante un sistema de engranes para transformar el movimiento angular en lineal.

Por lo anteriormente señalado, la rotación del rodillo en combinación con el movimiento horizontal de la varilla dinamométrica permite a una pluma sostenida en el extremo de la varilla, graficar escaladamente la curva fuerza-deformación en tiempo real durante las pruebas de

tensión o compresión. A partir de estas consideraciones, se propone la implementación de un sistema electrónico de adquisición de datos utilizando una placa de desarrollo ESP32 y dos encoders. El ESP32 será el encargado de recibir la información de los sensores (encoder) y registrar la información en un archivo de texto. Es relativamente sencillo adaptar el encoder destinado a registrar el desplazamiento, esto debido a que la maquina universal registra físicamente el desplazamiento mediante un movimiento de rotación en el rodillo (Figura 9). Mientras que la fuerza se registra a partir de un movimiento lineal, por lo tanto, se requiere de un sistema de conversión o de la búsqueda de otro elemento móvil relacionado a la fuerza. Analizando a detalle los mecanismos del dinamómetro, se encontró que la inclinación de un péndulo ubicado en la parte posterior de la sección de mando, esta relacionada con la fuerza desarrollada; esto debido a que funciona como contrapeso para el sistema hidráulico.

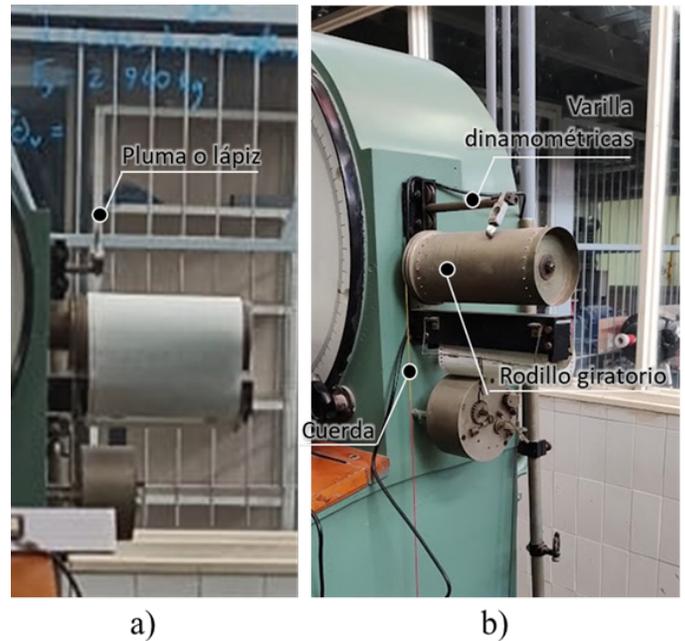


Figura 7. Graficador mecánico. a) Pluma y papel instalados. b) Sin pluma y papel instalados.



Figura 8. Detallado de la sección de pruebas de la maquina universal.

lico de fuerza. Utilizando un giroscopio (MPU9250) se demostró que la máxima fuerza se alcanza cuando el péndulo se orienta a 45° con respecto a la vertical (Figura 10).

Finalmente, se propone aprovechar el movimiento de rotación del péndulo y transmitirlo mediante otra cuerda para registrarlo por medio de otro encoder y posteriormente procesar esta información para convertirla en valores de fuerza (Figura 11). Como se puede observar, las bases y poleas para los sensores fueron construidas a partir de impresión 3D con filamento PLA. De esta manera se logó una implementación de instrumentación económica y poco invasiva al no interrumpir el proceso original para la graficadora física.



Figura 9. Instalación de encoder para registro del desplazamiento.

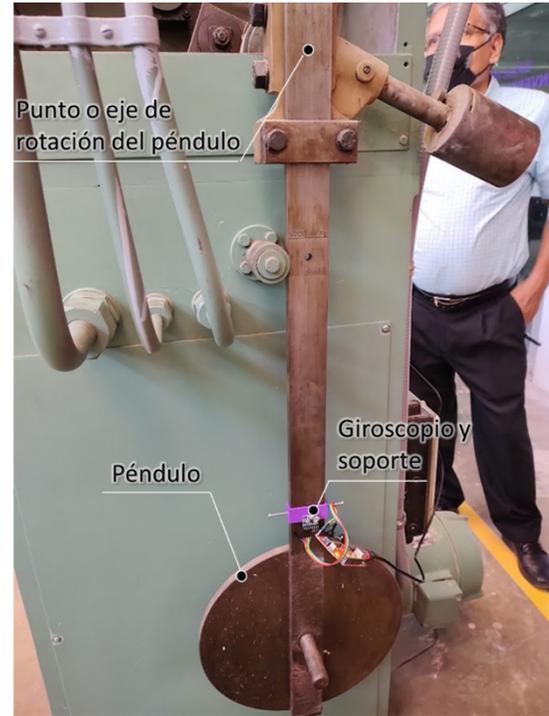


Figura 10. Péndulo de contrapeso acoplado al sistema hidráulico de fuerza.

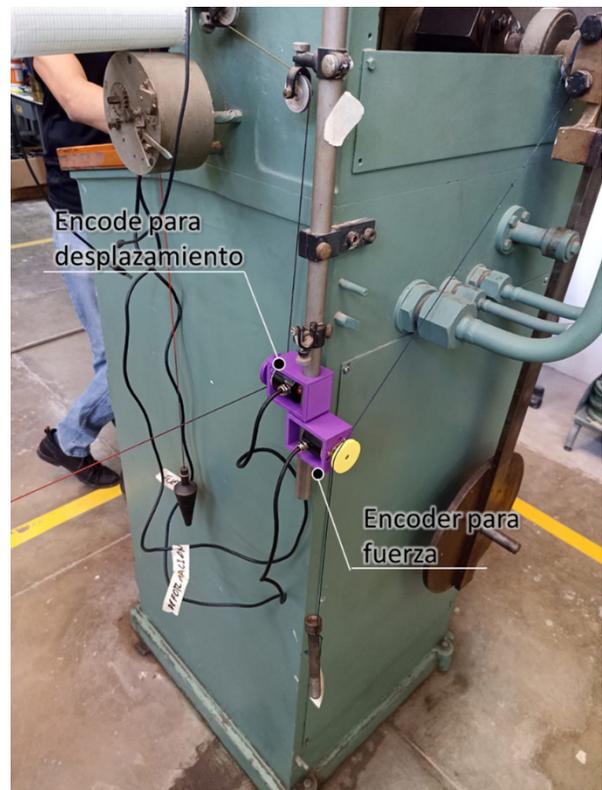


Figura 11. Instalación de sensores tipo encoder para registrar fuerza y desplazamiento.

En la Figura 12 se muestra el resultado de la prueba de tensión de una probeta de sección transversal circular. Se puede observar que el comportamiento de la curva generada a partir de datos adquiridos del sistema electrónico es cercano a los resultados mostrados por la graficadora mecánica y la aguja dinamométrica. Por lo tanto, el sistema electrónico de adquisición de datos puede auxiliar adecuadamente en el registro de resultados.

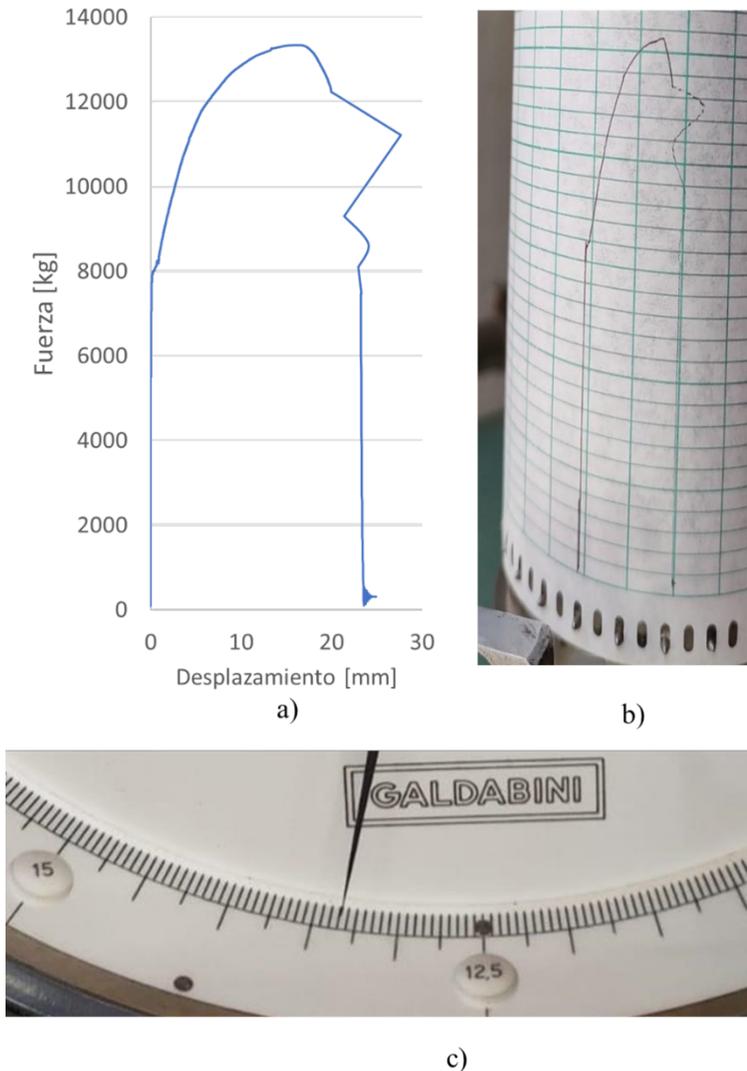


Figura 12. Resultados de prueba de tensión. a) Grafica digital. b) Grafica física. c) Aguja dinamométrica indicando la máxima fuerza desarrollada.

4. MAQUINADO DE PROBETAS

Los materiales de acero maquinados fueron del tipo-perfil placa, ángulo y redondo. De acuerdo con normas y el manual de la maquina universal, para pruebas de resistencia se deben emplear como mínimo tres probetas con el objetivo de obtener valores promedio. La placa y el ángulo fueron cortados y maquinados de acuerdo con el croquis y tabla de probetas planas proporcionado por el manual (Figura 13 y Tabla 1) [21 y 22]. Considerando las siguientes leyendas:

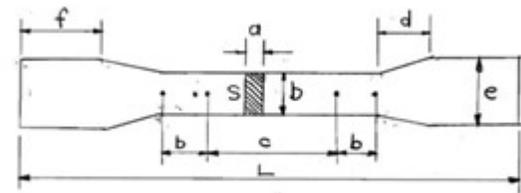


Figura 13. Croquis de probeta plana de sección rectangular.

- a: Grosor de la probeta en el tramo útil
- b: Ancho de la probeta en el tramo útil
- c: Longitud de la probeta en el tramo útil
- d: Longitud de la garganta
- e: Ancho de la cabeza
- f: Longitud de la cabeza
- s: Área del tramo útil
- p: Constante para determinar (c) $P = 1.13 \sqrt{s}$
- L: Longitud total de la probeta

En lo referente al perfil redondo, las probetas se cortaron y maquinados con base en el croquis de pro-

Tabla 1: Medidas para probetas planas largas y cortas.

Tipo	c	d	e	f	L
Probeta larga	10 P	25	50	80	$c + 2b + 210$
Probeta corta	5 P	25	50	80	$c + 2b + 210$

betas de sección circular proporcionado por el manual de la maquina universal (Figura 14 y Tabla 2).

Considerando las siguientes leyendas para sección circular:

- a: Diámetro de la probeta en el tramo útil
- b: Longitud de la probeta en el tramo útil
- c: Longitud del trecho de sección constante
- d: Longitud de la garganta
- e: Diámetro máximo de la garganta
- f: Longitud de la cabeza
- g: Diámetro de la cabeza
- h: Longitud de la probeta

En la Figura 15a se presenta el resultado del corte y maquinado de una probeta plana, muestras que en la Figura 15.b se muestra parte del proceso de maquinado por torno para la fabricación de una probeta de sección circular. Mientras que el montaje de las probetas en la sección de pruebas de la maquina universal es planteado en la Figura 16.

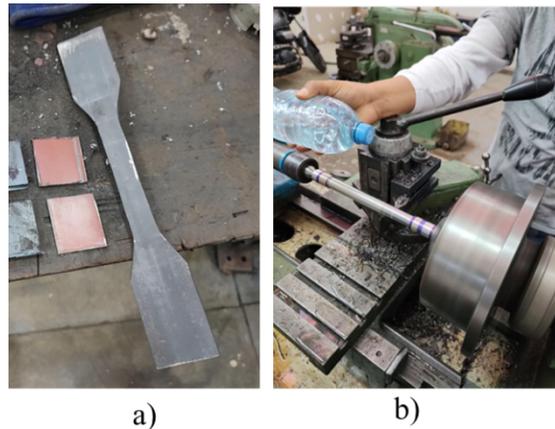


Figura 15. Maquinado. a) Probeta plana. b) Probeta circular.

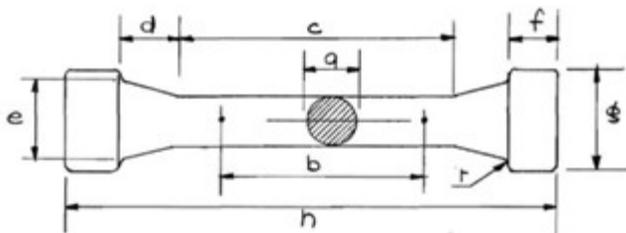


Figura 14. Croquis de probeta de sección circular.

Tabla 2: Medidas para probetas de sección circular.

Tipo	Normal Larga			Normal Corta			q	d	e	f	g	r
	b	c	h	b	c	h						
A	100	120	190	50	70	140	10	25	14	10	20	0.5
B	150	180	260	75	105	185	15	25	19	15	26	0.5
C	200	240	330	100	140	230	20	25	24	20	36	1
D	250	300	400	125	175	275	25	25	29	25	42	1

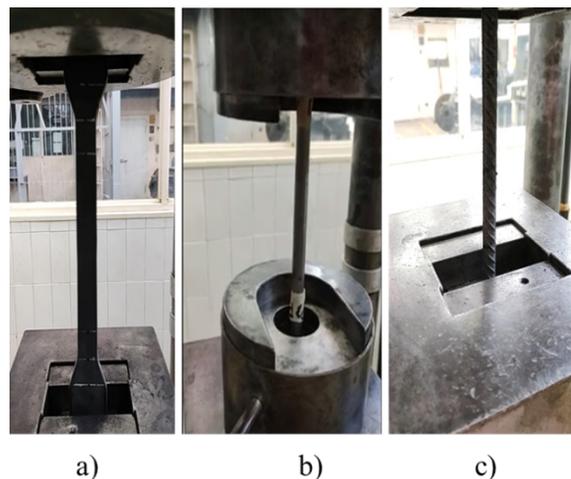


Figura 16. Montaje de probetas. a) Probeta plana. b) Probeta circular. c) Varilla corrugada.

5. RESULTADOS

En este apartado se anexan los resultados obtenidos de las distintas pruebas destructivas. La Tabla 3 muestra los tipos de perfil analizado, sus correspondientes resistencias esperadas y las resistencias promediadas debido a pruebas experimentales; donde: LEs es el límite elástico o esfuerzo de fluencia estándar o normado, UTs es el esfuerzo último o máximo estándar, LEe es el límite elástico experimental y UTe es el esfuerzo último experimental [23].

De la tabla de resultados, se puede observar que la resistencia a la fluencia no se alcanzó en los perfiles de tipo placa, ángulo y redondo, mientras que la varilla corrugada si logró desarrollar la resistencia esperada de acuerdo con su norma técnica de fabricación y propiedades mecánicas. En lo referente al esfuerzo último, todos los experimentos alcanzaron los valores esperados.

Utilizando la instrumentación electrónica adaptada a la maquina universal, ahora es posible recibir la información de manera inalámbrica y desde una amplia variedad de dispositivos debido al desarrollo e implementación de una interfaz gráfica y de adquisición de datos basada en programación web y comunicación wifi. La Figura 17 muestra el resultado

Tabla 3: Resistencias a la tensión

Perfil	Norma Técnica	LEs [ksi]	UTs [ksi]	LEe [ksi]	UTe [ksi]
Placa	ASTM	50 min	65-100	46.4	68.7
Angulo	A529	50 min	65-100	48.2	68.3
Redondo	GR 50	50 min	65-100	58.7	95.5
Varilla Corrugada 1/2" Ø	NMX GR 42	60 min	90	64.4	100.8

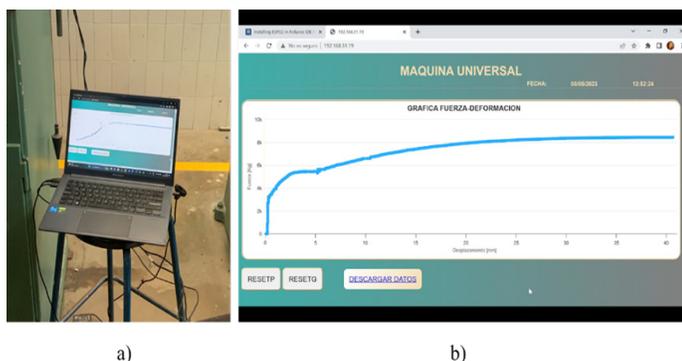


Figura 17. Sistema software. a) adquisición de datos. b) Captura de pantalla de la interfaz web.

anteriormente mencionado, donde se puede observar la interfaz web que permite adquirir datos y graficar el comportamiento en tiempo real.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el principio de funcionamiento de una maquina universal para pruebas destructivas del tipo hidráulico con péndulo de contrapeso, la cual utiliza un sistema mecánico para graficar y ofrecer resultados, el cual restringe la aplicación de técnicas computacionales modernas para el procesamiento de resultados. Por lo tanto, se planteó y se describió una propuesta de instrumentación económica y poco invasiva para digitalizar los resultados. La comparación del comportamiento de las curvas de resultados, tanto física como digital, mostró una correlación visual muy cercana y aceptable. Además, se estudió la resistencia de algunos de los materiales más utilizados en la construcción, donde se encontró que la placa, el ángulo y el redondo no alcanzaron los valores de resistencia a la fluencia esperados de acuerdo con sus correspondientes normas técnicas de fabricación y propiedades mecánicas.

7. REFERENCIAS

- [1] Flores Cano, (2010). Modelos esfuerzo-deformación para mampostería fabricada en México DF (Master's thesis, Universidad Autónoma Metropolitana (México). Unidad Azcapotzalco. Coordinación de Servicios de Información.).
- [2] Pelleg, J. (2013). Mechanical properties of materials (Vol. 190). Dordrecht: Springer.
- [3] Wigley, D. (2012). Mechanical properties of materials at low temperatures. Springer Science & Business Media.
- [4] Childs, T. H. C. (2003). Mechanical design. Elsevier.
- [5] Shigley, J. E., Mitchell, L. D., & Saunders, H. (1985). Mechanical engineering design.
- [6] JAIME, A., Selene, E., & FLORES, F. A. (2012). Análisis dinámico empleando espectros de diseño del reglamento (RCDF) y del manual de CFE (2008). Memorias XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Inge-

nería Geotécnica, publicación SMMS, Cacún, Quintana Roo.

[7] López Ortiz, A. (2011). Implicaciones estructurales de la construcción de edificios altos de mampostería para vivienda en la ciudad de México.

[8] Baqueiro, L. F., Gómez, F. M., Rivera, J. V., & Marín, G. V. (2009). Determinación de la resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante de la mampostería de bloques huecos de concreto. *Ingeniería*, 13(2), 41-50.

[9] Flores, V., Sánchez-Tizapa, S., Arroyo, R., & Barragán, R. (2013). Propiedades mecánicas de la mampostería de tabique rojo recocido utilizada en Chilpancingo, Gro (México). *Informes de la Construcción*, 65(531), 387-395.

[10] Ortega R. y Arroyo R. (2008). Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del block de concreto para la construcción de muros estructurales utilizados en edificios de viviendas de interés social, en la ciudad de Chilpancingo, Gro. *Memorias del XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Veracruz, Ver. México.

[11] Santana E. P. y Sánchez F. J. (2012). Propiedades mecánicas de una mampostería común de la zona conurbada de Colima-Villa de Álvarez. Tesis de licenciatura, Universidad de Colima, México.

[12] González, V., Botero, J. C., Rochel, R., Vidal, J., & Álvarez, M. (2005). Propiedades mecánicas del acero de refuerzo utilizado en Colombia. *Ingeniería y Ciencia*, 1(1), 67-76.

[13] Ñauta Uzhca, P. A., & Riera Morocho, C. X. (2015). Caracterización de propiedades mecánicas de los aceros para construcción de maquinaria que se comercializan en el Ecuador (Bachelor's thesis).

[14] Torres, J., & Redondo, J. (2009). Reparación y automatización de una máquina universal de ensayos. *Ciencia e Ingeniería*, 30(2), 171-179.

[15] Colcha Díaz, J. G., & Villa Orozco, M. E. (2010). Diseño e Implementación de un Sistema Electrónico-Informático para Aplicaciones en Ensayos en la Máquina Universal (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).

[16] House, J. W., & Gillis, P. P. (2000). Testing machines and strain sensors. *Mechanical Testing and Evaluation*, 8, 78-92.

[17] Arduino, S. A. (2015). Arduino. Arduino LLC, 372.

[18] Babiuch, M., Foltýnek, P., & Smutný, P. (2019, May). Using the ESP32 microcontroller for data processing. In 2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC) (pp. 1-6). IEEE.

[19] Upton, E., & Halfacree, G. (2014). Raspberry Pi user guide. John Wiley & Sons.

[20] Bell, C. (2014). Beginning sensor networks with Arduino and Raspberry Pi. Apress.

[21] Manual de maquina universal PM/50 Ton. Marca Italiana Galdabini

[22] A. society for testing and materials (ASTM), (2000). ASTM E8/E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

[23] Anderson, M., & Carter, C. J. (2012). Are You Properly Specifying Materials?. *Modern Steel Construction*, 52(2), 20-27.