



REVISTA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UAS



- **Resistencia a compresión de mortero de arcilla modificada con rastrojo de maíz para vivienda rural de El Fuerte Sinaloa**
Renato Vladimir Juárez-Soto, Estuardo Lara-Ponce, Olimpia Alvarado-Fierro, Carlos Hernán Lora-Urías, Manuel de Jesús Ungsson-Nieblas y Jorge Luis Almaral-Sánchez.
- **Curvas de fragilidad eólica para edificios con amortiguadores viscosos.**
Marco A. Santos-Santiago, Sonia E. Ruiz, Federico Valenzuela-Beltrán.
- **Water efficiency scenarios for green commercial buildings in Mexico and related CO₂ emissions.**
Montserrat Serrano-Medrano, Alissa Kendall.

Índice de contenido

7 Resistencia a compresión de mortero de arcilla modificada con rastrojo de maíz para vivienda rural de El Fuerte Sinaloa **Compressive strength of modified clay mortar with maize stubble for rural housing of El Fuerte Sinaloa**

Renato Vladimir Juárez-Soto, Estuardo Lara-Ponce, Olimpia Alvarado-Fierro, Carlos Hernán Lora-Urías, Manuel de Jesús Ungsson-Nieblas y Jorge Luis Almaral-Sánchez

18 Curvas de fragilidad eólica para edificios con amortiguadores viscosos **Wind fragility curves for buildings with viscous dampers**

Marco A. Santos-Santiago, Sonia E. Ruiz, Federico Valenzuela-Beltrán

26 Water efficiency scenarios for green commercial buildings in Mexico and related CO₂ emissions **Escenarios de consumo de agua para edificios verdes de uso comercial en México y sus emisiones de CO₂**

Montserrat Serrano-Medrano and Alissa Kendall

REVISTA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UAS

Órgano de difusión de la Facultad de Ingeniería, UAS

Dr. Jesús Madueña Molina

Rector

Dr. Gerardo Alapizco Castro

Secretario General

M.C. Salvador Pérez Martínez

Secretario de Administración y Finanzas

Dr. Mario Nieves Soto

Director General de Investigación y Posgrado

Dr. Fernando García Páez

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.

Comité Editorial

Dr. Alfredo Reyes Salazar

Universidad Autónoma de Sinaloa,
México

Dr. Edén 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 Metropoli-
tana, México

Dr. Mauro Pompeyo Niño Lázaro

Universidad Nacional Autónoma de
México, México

Dr. Francisco L. Silva González

Universidad Nacional Autónoma de
México, México

Dr. Julián Carrillo

Universidad Militar de Nueva Gra-
nada, Colombia

Dra. Sonia Elda Ruiz Gómez

Universidad Nacional Autónoma de
México, México

Dr. Gustavo Palazzo

Universidad Tecnológica Nacional
de Argentina, Argentina

Dr. Antonio Formisano

University of Naples Federico II,
Napoli, Campania, Italia

Dr. Francisco López Almansa

Universidad Politécnica de Catalu-
ña, Barcelona, España

Dr. Ivano Iovinella

University of Naples Federico II,
Napoli, Campania, Italia

Dra. Yu Jiao

Tokyo Institute of Technology, Japón

Dr. Julián Londono

University of Exeter, Reino Unido

Notas del Presidente del Colegio de Ingeniería y Tecnología

Estimados lectores:

Para la Universidad Autónoma de Sinaloa es muy satisfactorio presentar este primer número de la Revista Ingeniería y Tecnología UAS con el apoyo de la Dirección de Editorial y de investigadores de la Facultad de Ingeniería de la propia Institución. Esta propuesta está basada en las políticas institucionales del Plan de Consolidación global 2021 en lo relacionado al eje 6 denominado Extensión con Compromiso Social y en forma específica la acción 6.1 que hace referencia a otorgar apoyo a la difusión y extensión de la ciencia como parte fundamental del quehacer universitario.

Es una revista científica que difunde las investigaciones en el área de las ingenierías tanto de esta universidad como de otras instituciones de educación superior nacionales y del extranjero, pretende ser un instrumento de comunicación



abierta a toda la comunidad de investigadores interesados en esta área de la ciencia. El principal objetivo es contribuir a la difusión del trabajo científico y de calidad, para ello el consejo editorial de la misma cuenta con la colaboración de expertos reconocidos en la materia y cuidadosos de establecer criterios de calidad. Por ello, en cada ejemplar publicado se hará una revisión exhaustiva y anónima por parte de

investigadores con reconocida solvencia académica.

La revista tendrá una periodicidad semestral con acceso abierto y gratuito permitiendo la transferencia de conocimiento al mundo académico y a la sociedad en general, nace la revista con resultados de investigaciones llevadas a cabo por investigadores de la Facultad de Ingeniería.

Confiamos en que los contenidos de este número sean de su interés y que les resulten de utilidad para estudios y publicaciones futuras. Así mismo, los invito a participar en próximos números y a registrarse como usuarios de la misma, la convocatoria está abierta. Bienvenidos sean todos.

Muchas gracias.

Dr. Fernando García Páez
Presidente del Colegio de
Ingeniería y Tecnología.

Agradecimientos

Los miembros de la Revista RIT-UAS queremos agradecer a las personas e instituciones que han hecho posible esta nueva revista electrónica.

Debemos nuestra gratitud ante todo al **Dr. Jesús Madueña Molina**, Rector de la Universidad Autónoma de Sinaloa, al **Dr. Carlos Ayala Barrón**, Director de Editorial UAS y al **Dr. Mario Nieves Soto**, Director General de Investigación y Posgrado, por su apoyo al inicio del proceso de la preparación y creación de esta revista.

Agradecemos al **Centro de Computo Universitario** por el espacio que nos han brindado en sus servidores. Además, apreciamos las horas de trabajo y la ayuda técnica de la **Lic. Yamel Adriana Cárdenas Aragón** en diseño y fotografía y **MTE. Alan Gabriel Lazcano Beltrán** en diseño.

A todos ellos, **¡gracias!** por hacer posible la publicación de la revista RIT-UAS.

Perfil del Editor

Dr. Edén Bojórquez Mora

Dr. Edén 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 cursó estudios de Maestría y Doctorado en Ingeniería en el Instituto de Ingeniería de la UNAM donde obtuvo el grado con mención honorífica. PREMIO a la mejor tesis Doctoral en el sexto Concurso Nacional de Tesis de Doctorado (2009) otorgado por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, unos años más tarde, su hermano el Dr. Juan Bojórquez Mora, también ganaría dicha distinción. PREMIO por el artículo más sobresaliente de la Revista de Ingeniería Sísmica (Revista Científica de Excelencia por CONACYT) durante el periodo 2009-2010 como autor único, otorgado por el Presidente de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica Dr. Jorge Aguirre González. PREMIO por dirigir la mejor tesis de Posgrado a nivel Estado otorgado por INAPI 2013-2014. PREMIO por dirigir las mejores tesis de Licenciatura a nivel nacional relacionadas a la Ingeniería Estructural por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Realizó una estancia Posdoctoral en 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). Actualmente es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) y es el primer Ingeniero Civil en recibir la distinción SNI nivel 2 en la historia de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Miembro honorífico del Sistema Sinaloense de Científicos y Tecnólogos, así como del Cuerpo Académico Consolidado de Estructuras y Mecánica Básica. Autor de más de 250 artículos en Revistas Científicas y Congresos Nacionales e Internacionales. Ha sido director de más de 60 tesis de Licenciatura, Maestría y Doctorado, actualmente dirige varias tesis de Maestría y de Doctorado incluyendo estudiantes de distintas Universidades (UAS, UNAM, UABC entre otras), y ha supervisado a 30 estudiantes durante veranos



de la investigación científica. Es revisor de varias revistas científicas tales como: Earthquakes and Structures, Earthquake Spectra, Bulletin of Earthquake Engineering, Engineering Structures, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Wind and Structures, Journal of Civil Engineering de Korean Society of Civil Engineering KSCE, Ingeniería, Investigación y Tecnología editada por la Facultad de Ingeniería de la UNAM e Ingeniería Civil Sostenible, DYNA Colombia otras, así como Revisor de artículos para el 15th World Conference on Earthquake Engineering y Moderador en eventos académicos. Miembro del Comité Científico del 16th World Conference on Earthquake Engineering y muchos otros eventos nacionales e internacionales, ha dado varias conferencias incluyendo magistrales en países como Emiratos Árabes Unidos (Dubai). Es miembro del Registro CONACYT de Evaluadores Acreditados RCEA y de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. Ha participado en la evaluación del Sistema Nacional de Investigadores y de proyectos de investigación de ciencia básica del CONACYT, así como en la evaluación de proyectos de investigación del Programa de Fomento y Apoyo a Proyectos de Investigación PROFAPI de la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma de Sinaloa de la Universidad de Aguascalientes entre otras. Es revisor de proyectos para asignar fondos a grupos de investigación por parte del Ministerio Italiano de educación. Coordinador de la apertura de la Maestría y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la Facultad de Ingeniería Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa 2009. Participó en la elaboración de los Proyectos

de Maestría y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería para su incorporación al Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT (ambos pertenecen al Padrón de excelencia del CONACYT). Actualmente, es el Coordinador de la Maestría y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la unidad Culiacán y es miembro del Comité Académico y Núcleo Académico Básico de dichos Programas. Es el EDITOR de la Revista de Ingeniería Sísmica de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica la más prestigiosa en el mundo en su área escrita en español, así como de la Revista de Ingeniería y Tecnología UAS y ha sido Editor invitado de varias revistas indizadas en JCR como las Revistas Shock and Vibration y Advances in Civil Engineering. En 2016 fue Galardonado con el PREMIO INGENIERO CIVIL DEL AÑO otorgado por el Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Sinaloa 2016- 2017. Se ha desempeñado como VICEPRESIDENTE de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. El Dr. Bojórquez ha impartido cátedras y conferencias en el Colegio de Ingenieros Civiles de México entre las que se encuentran: “Una mirada a los desafíos de la ingeniería sísmica mexicana en las futuras normas de diseño” en el evento México a través de los sismos a mas de 100 años de monitoreo y reglamentación. 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, Pavia 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 naturales, fragilidad de estructuras, edificios con disipadores de energía, diseño sismo-resistente sustentable, inteligenci artificial y otros temas encaminados al futuro desarrollo de un Reglamento de Construcción específico para los Municipios del Estado de Sinaloa. Dentro de su vida académica ha formado tres doctores que son parte del Sistema Nacional de Investigadores y se espera que en el 2022 otros tres de sus estudiantes ingresen al SNI.

Resistencia a compresión de mortero de arcilla modificada con rastrojo de maíz para vivienda rural de El Fuerte Sinaloa

Compressive strength of modified clay mortar with maize stubble for rural housing of El Fuerte Sinaloa

Renato Vladimir Juárez-Soto¹, Estuardo Lara-Ponce¹, Olimpia Alvarado-Fierro², Carlos Hernán Lora-Urías², Manuel de Jesús Ungsson-Nieblas³ y Jorge Luis Almaral-Sánchez^{3*}

RESUMEN

Se elaboró un mortero de arcilla modificada (AM) con 5% de cemento y 5% de cal, en peso, adicionado con rastrojo de maíz, en polvo (RP) y con tamaño máximo de 3 mm (R3), en 1- 5 %, en peso respecto a la AM, con aplicación para construcción de vivienda en el El Fuerte, Sinaloa, México. El mortero elaborado es un nuevo material, respecto a los similares reportados anteriormente, porque se fabricó a temperatura ambiente y se usó el rastrojo de maíz en su composición. Los resultados determinaron que la resistencia a la compresión ($f'c$) para la muestra de referencia fue de 18 kg/cm² y disminuyó inversamente con el incremento de rastrojo de maíz. Con adición de RP en 1 %, 3 % y 5 %, la $f'c$ fue 8.6, 2.5 y 2.1 kg/cm², respectivamente y con adición de R3 en 1 %, 3 % y 5%, de 6.5, 2 y 1.2 kg/cm², respectivamente. En la morfología por SEM, se observó la formación de productos de hidratación del cemento y cal y rastrojo de maíz.

Recibido: septiembre 2018

Aceptado: enero 2019

Publicado: junio 2021

Palabras Clave:

vivienda rural; sustentabilidad; mortero-arcilla; cemento-cal-rastrojo de maíz.

Keywords:

rural housing; sustainability; mortar-clay; cement-lime; maize stubble.

ABSTRACT

A modified clay mortar (AM) was prepared with 5% cement and 5% lime, by weight, added with maize stubble, powder (RP) and with a maximum size of 3 mm (R3), in 1-5. %, in weight with respect to the AM, as material for housing construction in the municipality of El Fuerte, Sinaloa, México. The mortar made is a new material, compared to the similar ones reported previously, because it was manufactured at room temperature and the corn stubble was used in its composition. The results determined that the compressive strength ($f'c$) for the reference sample was 18 kg / cm² and decreased inversely with the increase of maize stubble. With addition of RP in 1%, 3% and 5%, the $f'c$ was 8.6, 2.5 and 2.1 kg/cm², respectively and with addition of R3 in 1%, 3% and 5%, of 6.5, 2 and 1.2 kg/cm², respectively. In the morphology by SEM, the formation of hydration products of cement and lime and corn stubble was observed.

1. INTRODUCCIÓN

El municipio de El Fuerte, se ubica al norte del estado de Sinaloa, México, cubre el 7.49 % de la superficie del estado, tiene 390 localidades y una población de 97,536 habitantes (Lara et al., 2016). En México, a mediados del siglo XX hasta hoy en día, la construcción de nuevas viviendas, corresponden en gran

*Autor para correspondencia: Almaral-Sánchez Jorge Luis

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

¹ Universidad Autónoma Indígena de México, Unidad Los Mochis, Posgrado en Ciencias en Desarrollo Sustentable de los Recursos Naturales, México. ² Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería Culiacán, Departamento de Laboratorios, México. ³ Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería Mochis, Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, México

medida a las condiciones económicas de la población, que usualmente son de interés social, son grandes consumidoras de energía y demandan un sistema de climatización artificial para poder hacerlas confortables. Generalmente estas viviendas utilizan materiales que en su producción generan grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) (Zayas, 2013), como el cemento, que por cada tonelada producido se libera a la atmosfera alrededor de una tonelada de CO_2 , 7% globales (Mehta, P. 2004). La vivienda puede ser construida en serie con sistemas prefabricados, con el objetivo de cubrir las necesidades prioritarias de habitación de la población que la demanda, por tanto, la calidad de vida es enteramente sacrificada (Rojo, 2008). Una vivienda sustentable es la que busca aprovechar los recursos naturales para minimizar el impacto ambiental de la construcción sobre el ambiente natural y los habitantes, son económicamente viables, eficientes en energía, agua, con manejo adecuado de los residuos y en elección de materiales para su construcción; promueven la salud de sus habitantes, preservan el hábitat y ecosistemas, impulsan la comunidad, son de mayor calidad y su operación es menos costosa (Paz et al., 2015). Además, debe satisfacer las necesidades de la población sin explotar los recursos naturales o contaminar el medio ambiente, utilizando materiales locales y diseños apropiados a las condiciones del clima y cultura de la región, para desarrollar una construcción funcional, bella y sustentable. Es preferible utilizar materiales naturales de la región, como la tierra, la piedra, el bambú, el carrizo y la paja (Comisión Nacional Forestal, 2008). A partir de este análisis, se destaca la necesidad de desarrollar técnicas y materiales de construcción integrales que garanticen la seguridad estructural y un desarrollo urbano sostenible (Carrillo, J, y Alcocer, S.M., 2012). Por ello y considerando los efectos del cambio climático sobre el planeta, varias investigaciones se enfocan en obtener materiales para construcción que generen menos contaminantes en su propia elaboración, con mejores funciones y cualidades (Akadiri P.O., 2012).

Se han utilizado productos agrícolas para la construcción sustentable y como adición en la elaboración de morteros de arcilla-cal-cemento, tales como el bagazo de caña de azúcar, arroz y trigo, paja y cáscara, residuos de verduras, productos alimenticios, té, producción de aceite, fibra de yute, cáscara de cacahuete, residuos de madera, cáscara de coco, tallo de algodón, entre otros (Madurwar, Ralegaonkar y Mandavgane, 2013). Se evaluó el rendimiento mecánico, físico y

electroquímico en morteros con consistencia plástica según ASTM C 1437-99, reemplazo del cemento Portland ordinario (OPC) por ceniza de cáscara de arroz (RHA) y óxido de sílice nano (nSO), conduciendo estudios de resistencia mecánica a la compresión simple, porosidad, absorción superficial, prueba rápida de penetración de cloruro (RCPT) y corrosión acelerada en morteros con reemplazos de OPC de 1.0% de nSO y 20.0% de RHA. Según los resultados, el uso simultáneo de nSO + RHA tiene un mayor rendimiento en las propiedades de los morteros con disminuciones en la porosidad y la carga total pasada de 3.9% y 75.6%, y un aumento en la resistencia a la compresión y corrosión de 7.1% y 37.6%, respectivamente (Pellegrini et al., 2013). Se investigó la influencia de la carbonatación en morteros que contienen un 25% de ceniza volante en sustitución del material cementante. Se fabricaron especímenes cilíndricos de mortero para cuatro relaciones agua/cemento (A/C) de 0.35, 0.45, 0.55 y 0.65. Los morteros con y sin ceniza volante fueron sometidos a un proceso acelerado de carbonatación. Se determinó el peso volumétrico, la absorción, la resistencia a la compresión, la permeabilidad al agua, el PH y la porosimetría por intrusión de mercurio. Por efecto de la potencialidad puzolánica de la ceniza volante, para las cuatro relaciones A/C, los resultados de la resistencia a la compresión a los 28 días de los morteros con y sin ceniza volante permanecen similares. Los morteros con ceniza volante presentan coeficientes de permeabilidad al agua, a 28 días, similares a los morteros sin ceniza volante. Para todos los morteros, los resultados de los análisis porosimétricos indican que la porosidad disminuye por efecto de la carbonatación (Valdez et al., 2009). Se investigó el efecto de la ceniza del bagazo de caña de azúcar (SBAS por sus siglas en ingles) en los morteros, específicamente su resistencia a la compresión, porosidad, profundidad de carbonatación y penetración de cloruro. La sustitución de arena natural por SBAS, especialmente con un contenido del 30%, puede llevar a mantener las propiedades mecánicas, la obstrucción de microporos y la mejora de la durabilidad de los morteros, en comparación con una mezcla de referencia (Almeida et al., 2015). Se estudió el comportamiento mecánico y físico del concreto con reemplazo de ceniza de bagazo de caña de azúcar por arena, en 0%, 10%, 20%, 30% y 40% en volumen, se concluye que, la fracción fina de agregado puede ser reemplazada por ceniza de bagazo de caña en 10-20% en volumen sin una considerable pérdida de trabajabilidad y propiedades de esfuerzo

(Modani, P.O. y Vyawahareb, M.R., 2013). Se realizó un análisis del efecto de la ceniza fina de bagazo de caña (SCBA por sus siglas en inglés) con tamaño menor a 45 micras, y su efecto en el manejo de la mezcla y la resistencia a la compresión de morteros. Los resultados obtenidos indican que la sustitución de clinker con 20% de SCBA es apropiado para la producción a escala de laboratorio y con una relación agua/cemento de 0.735 se obtiene el adecuado manejo en sus mezclas realizadas (Muangtong et al 2013). Se mezclaron diferentes tipos de arcilla con paja de arroz (RS) y celulosa microcristalina (MCC) en presencia o ausencia de polvo de horno de cemento (CKD) para producir nuevos tipos de ladrillo. Las relaciones de RS y MCC fueron 0, 5 y 10% p/p en ausencia de MCC, mientras que se mantuvieron al 5% p/p en su presencia. Las muestras producidas se compararon con ladrillos “mezclados” preparados con un 10% p/p de MCC, a temperaturas hasta 1000 ° C y su superficie y composición se estudiaron con SEM y XRD. Además, se determinaron las propiedades químicas y físicas de los ladrillos preparados. La introducción de RS redujo tanto la resistencia a compresión como la densidad aparente, pero aumentó la porosidad de las muestras preparadas. La presencia de MCC solo aumentó la resistencia a la compresión, mientras que la combinación de RS con CKD superó la disminución de la fuerza resultante de la presencia de RS solo.

Esto ha permitido la producción de ladrillos ligeros de bajo costo con una resistencia a la compresión cercana a los ladrillos sin mezclar, especialmente a altas temperaturas de cocción (Mohammed, M. S. et al., 2013). Se utilizó la hoja de maíz como posible fuente de material puzolánico en sustitución parcial del cemento Portland a emplear en las obras de construcción para la elaboración de morteros y concretos, evaluando las características físicas y químicas del material, así como algunas de sus propiedades principales desde el punto de vista constructivo, entre las que destacan la resistencia a la compresión y la durabilidad, concluyendo que el material en estudio posee grandes potencialidades de ser empleado con estos fines, en reemplazos no mayores del 20% de cemento (Águila y Sosa, 2005). Se investigaron las propiedades mecánicas y el análisis morfológico de Al-Si-Mg compuestos de partículas de tallo de maíz carbonizado de Al-Si-Mg y las partículas de tallo de maíz carbonizado como refuerzo que varía del 2% al 10% en un intervalo del 2%. Los resultados de las microestructuras del material compuesto muestran

una dispersión uniforme del refuerzo a lo largo de los límites de grano de la aleación. La resistencia a la tracción y dureza aumentan a 85.60 N / mm² y 24HRB a 8 y 10% en peso de tallo de maíz carbonizado, respectivamente, pero hay una ligera disminución en los valores de energía de impacto, valores de porcentaje de alargamiento y reducción de porcentaje en el área como refuerzo aumenta. Se concluyó que las partículas de maíz reforzadas y carbonizadas se pueden utilizar para mejorar las propiedades de la aleación de Al-Si-Mg para aplicaciones de ingeniería (Oghenevweta, J. E. et al, 2013). Se estudió el efecto de adicionar ceniza de mazorca de maíz en sustitución del cemento en mortero de arcilla-cemento-ceniza de mazorca de maíz, dando como resultado que el reemplazo de 20% de cemento por ceniza en la mezcla mejora la absorción de agua y la durabilidad de las muestras, mientras que no hay una diferencia significativa entre la resistencia del mortero producido con 0.0 y 20.0%. A su vez, la arcilla se estabiliza dando mayor resistencia, menor conductividad térmica y menor absorción de agua que la tierra estabilizada con cemento simple (Adesanya, 1996). Existe un interés creciente en materiales de construcción de arcilla sin cocer, de buen comportamiento físico del material, y con respecto a un diseño ecológico, consciente de la necesidad de ahorro de energía y del desarrollo sostenible, que cumpla con todos los requisitos de resistencia y capacidad de servicio para la transmisión o valor térmico (Oti, Kinuthia y Bai, 2010).

Se elaboraron ladrillos con arcilla (de Oxford, Inglaterra) sin cocer, estabilizada con escoria de alto horno granulada (EAHG), combinados con cemento Portland o cal, los resultados mostraron que la resistencia a la compresión de los ladrillos producidos utilizando arcilla estabilizada con cal fue mayor que los adicionados con cemento (Oti y Kinuthia, 2012). Se incorporaron residuos de la industria minera-metalúrgica en la producción de ladrillo de arcilla-cal a temperatura ambiente, de la región de Brasil (Estados de Sao Pablo, Minas Gerais, Río de Janeiro y Espíritu Santo); fue utilizado una parte de aglomerado por 10 partes de arcilla para ladrillo y a ésta mezcla se le adicionó 25%, 50% y 75% de escoria de la fabricación de aleaciones Fe-Si-Mn o polvo de esteatita, reemplazando parte de la cal; los resultados demostraron que ambos reemplazos (esteatita y escoria de Fe-Si-Mn) tienen composiciones químicas útiles para actividades puzolánicas y sus resistencias a compresión a 28 y 60 días de curado, estuvieron dentro de las especificacio-

nes estándar (>2.0 MPa) (Ferreira W.L., Reis E.L. y Lima R.M.F., 2015).

Este trabajo de investigación se considera oportuno debido a que actualmente en el municipio de El Fuerte, Sinaloa; no se tienen diseños de vivienda construidos con materiales ecológicos, donde la generalidad de estos materiales de construcción, sean materiales de desecho o de residuos agrícolas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Materias primas

El experimento se realizó en el laboratorio de construcción de la Facultad de Ingeniería Culiacán y Mochis de la UAS, donde se efectuaron las mediciones y análisis para determinar las propiedades mecánicas de los materiales en estudio, bajo principios de ca-

lidad y confiabilidad. Los materiales utilizados para generar el mortero compuesto de arcilla, cal, cemento y rastrojo de maíz, fueron: arcilla natural de una ladrillera, cemento gris tipo Portland compuesto 30-R, cal hidráulica natural y rastrojo de maíz en pacas, cosechado de predios agrícolas del valle El Fuerte; se adicionó a la mezcla agua de la red potable de la ciudad de Los Mochis, Sinaloa (Figura 1).

Equipo

El equipo utilizado para moler el rastrojo de maíz y obtener partículas de tamaño máximo de 3 mm, fue una picadora de forraje eléctrico, modelo PD6 COMPACT MIX, con motor de 2 HP y motor eléctrico monofásico de 220 Volts (Figura 2).



Figura 1. Materiales utilizados para generar el mortero arcilla-cal-cemento-rastrojo de maíz: a) Arcilla, b) Cemento Portland, c) Cal hidráulica y d) Paca de rastrojo de maíz.



Figura 2. Picadora de forraje eléctrico utilizado para obtener rastrojo en tamaño de 3 mm.

El equipo utilizado para moler el rastrojo de maíz y obtener polvo, fue una picadora de forraje eléctrico, modelo St-200, con motor eléctrico de 6.5 HP (Figura 3).

La resistencia a la compresión se realizó mediante una prensa universal de pruebas mecánicas, marca ELE international, con velocidad de carga de 60 kg/s. Previamente, se midió con un calibrador vernier analógico cada una de las aristas de los cubos de muestra y se tomó como dato el promedio. La morfología se analizó mediante el microscopio electrónico de barrido Jeol JSM-5800LV.

Desarrollo del experimento

1. Procedimiento para la obtención del rastrojo de maíz molido

Se hicieron dos tipos de materiales mediante un proceso de molienda y trituración. La primera consistió en la obtención de rastrojo de maíz con tamaño de 3 mm (R3), en la que se utilizó la picadora de forraje eléctrico, introduciendo el tallo, olotes y hojas y moliéndose en tamaño de 3 mm, lo cual consigue por la potencia y cribas que tiene acopladas el molino. La producción del material utilizado fue de 10 kg de rastrojo por hora. Para la segunda obtención del rastrojo de maíz en polvo (RP), se utilizó la picadora de forraje eléctrico, en la que se introdujo el material obtenido de (R3), el rendimiento fue de 3 kg/hora. Estos agregados

se adicionaron a las mezclas de mortero elaboradas con arcilla, cal y cemento (R) en proporciones de 1%, 3% y 5% respecto al peso total de la arcilla.

2. Elaboración de las mezclas

El siguiente paso consistió en el diseño de mezclas del mortero arcilla-cal-cemento rastrojo de maíz. Los tratamientos empleados se presentan en la Tabla 1. Las claves significan: R, muestra de referencia elaborada con arcilla-cemento-cal, sin adición de ningún compuesto de rastrojo (RP o R3); R31, que es el R3 con adición de 1% de rastrojo respecto al peso de la arcilla; RP1, que consistió en RP con adición de 1% de rastrojo; y en el resto de las muestras varió en la adición del porcentaje de rastrojo empleado (3 % y 5 %).

3. Elaboración del mortero arcilla-cal-cemento-rastrojo de maíz

El proceso de mezclado y elaboración del mortero arcilla, cal, cemento y rastrojo de maíz (Figura 4) se describe a continuación: a) se pesó la materia prima; b) se mezcló el material manualmente en las proporciones deseadas con arcilla en estado seco por 5 min; c) se añadió agua a la mezcla seca, agitando por un tiempo de 15 a 30 min; d) Vertido de la mezcla en moldes de 5 x 5 x 5 cm, lubricados con aceite a temperatura ambiente; e) se elaboraron tres especímenes por cada proporción; y f) se desmoldaron a las 24 horas y se cubrieron con plástico para que conservaran humedad.



Figura 3. Picadora de forraje eléctrico utilizado para obtener rastrojo de maíz en polvo.

Tabla 1. Diseño de mezclas del mortero arcilla-cal-cemento- rastrojo de maíz.

Mortero	Rastrojo		Cal (gr)	Cemento (gr)	Arcilla (gr)	Agua (ml) (25%)
	%	(gr)	(5%)	(5%)	(100%)	
R	0%	-	42.5	42.5	850	233.75
RP1	1%	8.5	42.075	42.075	841.5	242.98
RP3	3%	25.5	41.225	41.225	824.5	260.75
RP5	5%	42.5	40.375	40.375	807.5	277.58
R31	1%	8.5	42.075	42.075	841.5	242.98
R33	3%	25.5	41.225	41.225	824.5	260.75
R35	5%	42.5	40.375	40.375	807.5	277.58



Figura 4. Proceso de mezclado y elaboración del mortero arcilla-cal-cemento-rastrojo de maíz.

3. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Resistencia a compresión

Los resultados de la resistencia a la compresión de las muestras de mortero ensayados con tiempo de endurecimiento a los 28 días de acuerdo a la norma C-486-ONNCCE-2014 (Pérez, A. 2015), se presentan en la Tabla 2. Se observa que la resistencia a la compresión para la muestra de referencia (R) es de 18 kg/cm², valor menor a 40 Kg/cm², que recomienda la misma norma para el mortero de arcilla cocido para uso estructural. El siguiente valor es el referido con adición de 1 % de rastrojo en polvo (RP1), se encontró que la resistencia a la compresión disminuye a 8.6 kg/cm² y con adición de 3% de rastrojo en polvo, a 2.5 kg/cm². El mismo comportamiento se tiene con la adición de rastrojo con tamaño máximo de 3 mm a 1 %, 3 % y 5 %, obteniendo resistencia a la compresión de 6.5, 2 y 1.2 kg/cm², respectivamente. En la Figura 5, se muestra gráficamente la resistencia a la compresión referida, de los modelos con adición de rastrojo en polvo (RP1, RP3 y RP5), contra los que se les adicionó rastrojo con tamaño máximo de 3 mm (R31, R33 y

R35). Se observa que en los tres casos, la resistencia a la compresión es menor cuando se utiliza rastrojo con tamaño máximo de 3 mm, RP1 presenta 8.65 kg/cm² de resistencia a la compresión, mientras que R31, 6.5 kg/cm², RP3; 2.5 kg/cm², mientras R33, 2 kg/cm²; RP5, 2.1 kg/cm² y R35, 1.2 kg/cm², respectivamente.

Comparando estos resultados con el estudio realizado por Hernandez (2011), se observa que a más R3 en la mezcla de mortero de arcilla, cal y cemento, la resistencia a la compresión disminuye debido a la porosidad que genera este material, ya que la densidad de R3 es mayor.

Morfología.

En la Figura 6 se muestra la micrografía por microscopía electrónica de barrido (SEM) a 3000 aumentos, de un compuesto de arcilla en polvo con adición de cemento y cal, después de 28 días de su elaboración, mantenido en saturación de agua para su curado, donde se pueden observar plaquetas hexagonales, calcita en formas poliédricas irregulares, silicato de calcio hidratado (C-S-H), etringita y

Tabla 2. Resultados de la resistencia a la compresión de las muestras de mortero ensayados con tiempo de endurecimiento a los 28 días.

Clave	Resistencia compresión
	(Kg/cm ²)
R	18
RP1	8.6
RP3	2.5
RP5	2.1
R31	6.5
R33	2.0
R35	1.2

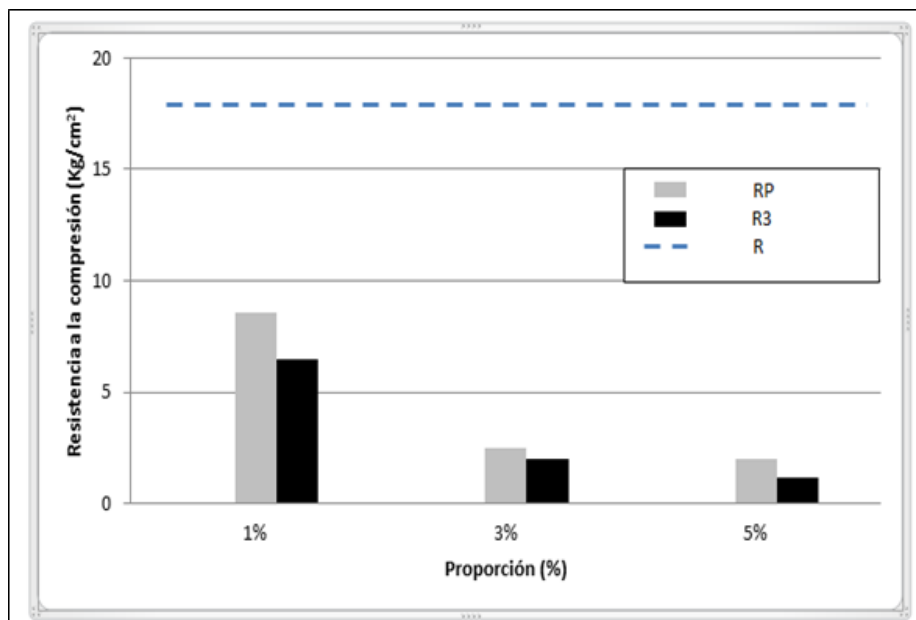


Figura 5. Efecto de RP y R3 en la resistencia a la compresión de mortero.

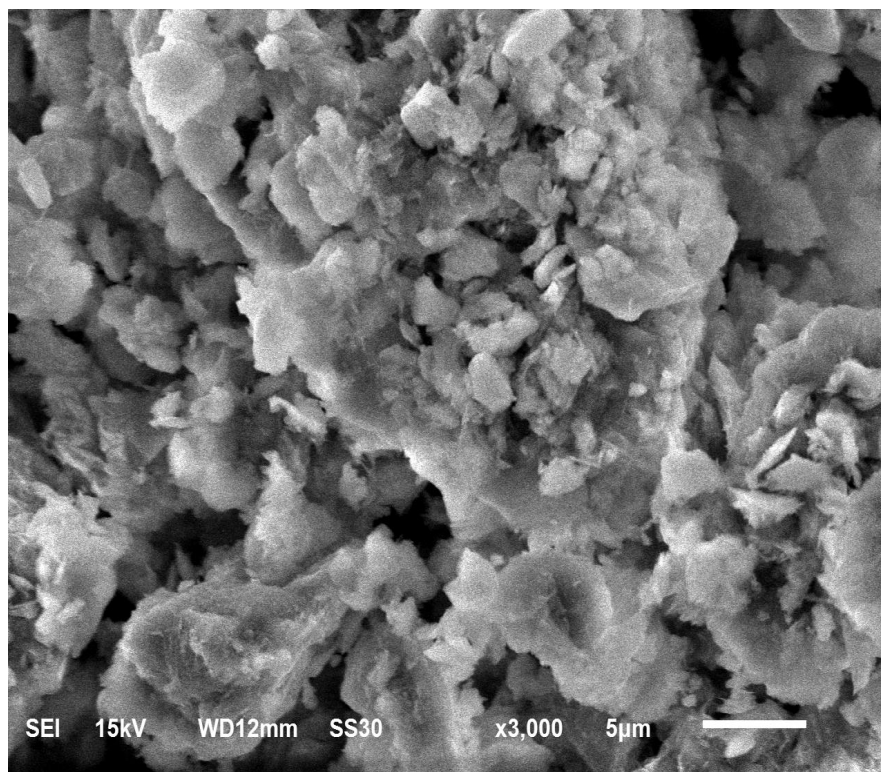


Figura 6. Micrografía por SEM a 3000 aumentos, de compuesto de arcilla en polvo con adición de cemento y cal, después de 28 días de su elaboración.

poros con superficie interna irregular, productos de la hidratación del cemento y de la cal, que modifican a la arcilla, reportado anteriormente (Arandigoyen M. et al., 2005; Lothenbach B. et al., 2007, Ma S. et al., 2015).

En la figura 7 se observa la micrografía por SEM a 3000 aumentos, de una muestra de composito de arcilla en polvo con adición de cemento, cal y rastrojo de maíz en polvo (5% de contenido por peso de arcilla), después de 28 días de su elaboración, mantenida en saturación de agua para su curado, donde se pueden observar, además de los productos de la hidratación del cemento y de la cal, fragmentos del rastrojo de maíz incorporados al composito.

4. CONCLUSIONES

El empleo de rastrojo de maíz como aditivo en la elaboración de morteros de arcilla con cemento y cal, produce un material ecológico con principios de sostenibilidad, porque se utilizan materiales de desecho y

favorece el empleo de menos cantidades de cemento y cal para fabricarlos.

Los morteros elaborados con arcilla, cal y cemento, sin utilizar temperatura para su cohesión, son materiales nuevos, porque hasta la fecha se han elaborado solo con altas temperaturas. Estos morteros alcanzaron una resistencia a la compresión de 45 % respecto al mortero de arcilla cocido a temperatura de 900-1,100 °C.

La adición de rastrojo de maíz en polvo o en tamaño máximo de 3 mm, y en porcentaje de peso de 1 %, 3 % y 5 % a la arcilla con cal y cemento para la fabricación de morteros, disminuye su resistencia mecánica a la compresión hasta en un 85 %.

La resistencia a la compresión disminuye inversamente con el incremento de la adición de rastrojo de maíz, correspondiente al porcentaje en peso de 1 a 5 % respecto al peso de la arcilla. La resistencia a la compresión es menor cuando se utiliza rastrojo con tamaño máximo de 3 mm respecto a utilizar rastrojo en polvo.

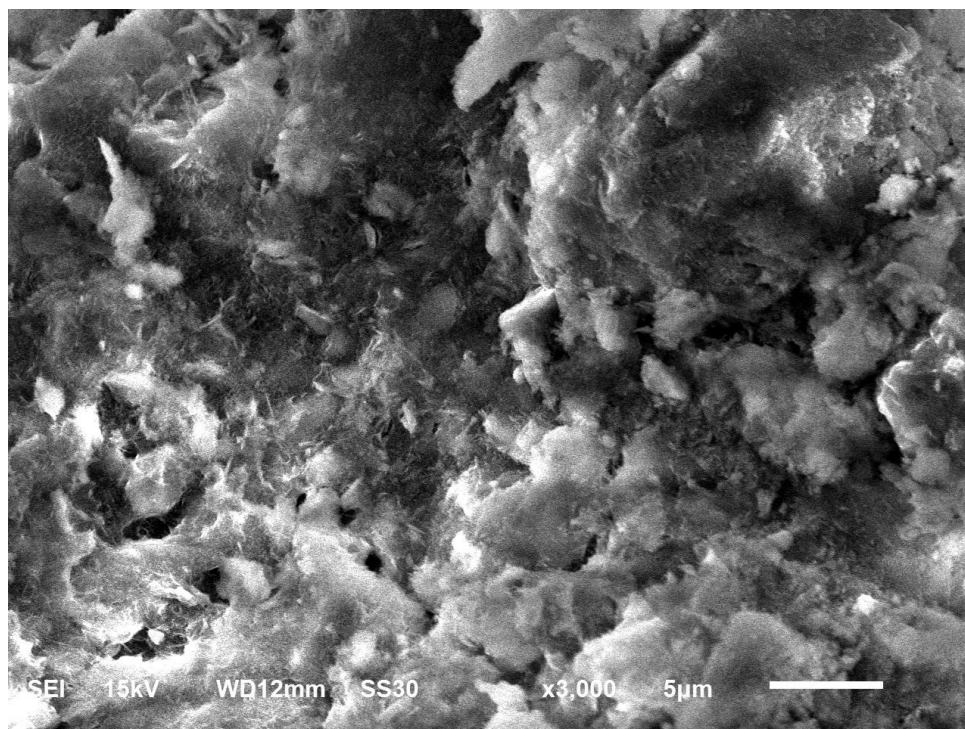


Figura 7. Micrografía por SEM a 3000 aumentos, de composito de arcilla en polvo con adición de cemento, cal y rastrojo de maíz (5%), después de 28 días de su elaboración.

Los morteros elaborados con arcilla, cal y cemento, adicionados con rastrojo, pueden tener una aplicación inmediata, para aplanados y en fabricación de elementos de construcción como ladrillos de arcilla más ligeros, adoquines, elementos decorativos como celosías, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Sinaloa, a la Facultad de Ingeniería Mochis, donde se desarrolló la fase experimental, a la Facultad de Ingeniería Culiacán, donde se llevó a cabo la fase de caracterización estructural y al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, donde se realizaron los estudios de SEM.

REFERENCIAS

Adesanya, D.A. (1996). Evaluation of blended cement mortar, concrete and stabilized earth made from ordinary Portland cement and corn cob ash. *Construction and Building Materials*, 10-6, 451-456.

Águila, I. y Sosa, M. (2005). Evaluación de la hoja del maíz como posible fuente de material puzolánico. *Tecnología Y Construcción*, 21(3), 9-17.

Akadiri P.O., Chinyio E.A. y Olomolaiye P.O. (2012). Design of A Sustainable Building: A Conceptual Framework for Implementing Sustainability in the Building Sector. *Buildings*, 2, 126-152.

Almeida, F., Sales, A., Moretti, J., y Mendez, P. (2015). Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. *Construction and building materials*, 8, 31-38.

Arandigoyen M., Pérez-Bernal J.L., Bello López M.A. y Alvarez J.I. (2005). Lime-pastes with different kneading water: Pore structure and capillary porosity. *Applied Surface Science*, 252, 1449-1459.

Carrillo, J., y Alcocer, S.M. (2012). Revisión de criterios de sostenibilidad en muros de concreto para viviendas sismorresistentes. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 13(4), 479-487.

Comisión Nacional Forestal. (2008). Tecnologías alternativas para el uso eficiente de recursos. *Transferencia de Tecnología y Divulgación sobre Técnicas para el Desarrollo Humano y Forestal Sustentable*.

Recuperado de: <http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/construccion-sustentable-casa-de-paja.pdf>

Ferreira W.L., Reis E.L. y Lima R.M.F. (2015). Incorporation of residues from the minero-metallurgical industry in the production of claylime brick. *Journal of Cleaner Production*, 87, 505-510.

Zayas, M.M., López, O. y Armenta, J. (2013). Factibilidad de construcción de casas ecológicas. *Revista de investigación académica sin fronteras*. 6(17), 1-21.

Lara, E., Sánchez, J.E., Pérez, M. y Ramírez, K. (2016). Sistema de Información Geográfica del territorio Yoreme-Mayo en el Norte de Sinaloa [CD-ROM]. Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa: Universidad Autónoma Intercultural de Sinaloa (UAIS).

Lothenbach B., Winnefeld F., Alder C., Wieland E. y Lunk P. (2007). Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 37, 483-491.

Ma S., Li W., Zhang S., Hu Y. y Shen X. Study on the hydration and microstructure of Portland cement containing diethanol-isopropanolamine. (2015). *Cement and Concrete Research*, 67, 122-130.

Madurwar, M. V, Ralegaonkar, R. V, y Mandavgane, S. A. (2013). Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 38, 872-878.

Mehta, P. K. (2004). High-performance, high-volume fly Ash concrete for sustainable development. *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, China, 3-14.

Modani, P.O. y Vyawahareb, M.R. (2013). Utilization of Bagasse Ash as a Partial Replacement of Fine Aggregate in Concrete. *Procedia Engineering*, 51, 25 - 29.

Mohammed, M. S., Ahmed, A. E.-S. I., Osman, R. M., & Khattab, I. (2013). Combinations of organic and inorganic wastes for brick production. *Polymer Composites*, 35(1), 174-179.

Muangtong, P., et al (2013). Effects of fine bagasse ash on the workability and compressive strength of Mortars. *Chiang Mai Journal of Science*, 40(1), 126–134.

Oghenevweta, J. E., Aigbodion, V. S., Nyior, G. B., & Asuke, F. (2016). Mechanical properties and microstructural analysis of Al–Si–Mg/carbonized maize stalk waste particulate composites. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 28(2), 222–229.

Oti, J. E., Kinuthia, J. M. y Bai, J. (2010). Design thermal values for unfired clay bricks. *Materials and Design*, 31(1), 104–112.

Oti, J. E. y Kinuthia, J. M. (2012). Stabilised unfired clay bricks for environmental and sustainable use. *Applied Clay Science*, 58, 52–59.

Paz, C.A.; Rivera, N.L. y Ledezma, M.T. (2015). El impacto de la sustentabilidad en la vivienda en serie de Nuevo León. *Contexto*, IX(11), 43-57.

Pellegrini-Cervantes, M.J., Almeraya-Calderon, A, Baldenebro-Lopez, F.J., Nuñez Jaquez, R.E., Fajardo-San-Miguel, G., Chacón-Nava, J.G., Barrios-Durstewitz, C.P., Martinez-Villafañe, A. (2013). Chloride Penetration in mortars with replacements of rice husk Ash and nano-SiO₂. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, 3-12, 24-30.

Pérez, A. (2015). Norma Mexicana NMX-C-486-ONNCCE-2014 mortero para uso estructural. México, D.F, 07 de noviembre de 2014.

Rojo, J.C. (2008). Culiacán, clima y arquitectura habitacional. México DF, Distribuciones Fontamara, S.A.

Valdez, P., Duran, A., Fajardo, G., y Juárez, C. (2009). Influencia de la carbonatación en morteros de cemento Portland y ceniza volante. *Revista ingeniería investigación y tecnología*, 10(1), 39-49.

Curvas de fragilidad eólica para edificios con amortiguadores viscosos

Wind fragility curves for buildings with viscous dampers

Marco A. Santos-Santiago¹, Sonia E. Ruiz¹, Federico Valenzuela-Beltrán²

RESUMEN

Se compara la fragilidad de edificios ante efectos del viento en términos de la aceleración de piso, para la evaluación del confort de sus ocupantes. La fragilidad se ilustra por medio del estudio de un edificio de 28 niveles con una gran área expuesta. El edificio se diseña de dos maneras: a) convencionalmente (sin amortiguamiento suplementario), y b) usando dispositivos disipadores viscosos no lineales. Las curvas de fragilidad se obtienen para tres umbrales de percepción de aceleración. Los resultados muestran que en el edificio con dispositivos viscosos, la aceleración de piso se reduce entre 6.5 y 10.3 veces, con respecto al edificio convencional, además, la probabilidad de exceder los umbrales de percepción se reduce de forma significativa.

Recibido: junio 2019
Aceptado: octubre 2019
Publicado: junio 2021

Palabras Clave:

fragilidad estructural; edificios concreto y acero; aceleración de piso

Keywords:

structural fragility; concrete and steel buildings; floor acceleration

ABSTRACT

The structural fragility associated with the wind effects on buildings is studied. The floor acceleration is used as demand parameter in order to assess the comfort of the occupants. The structural fragility is estimated for a 28-story building with a large exposed area. The building is designed in two alternative ways: a) conventionally (without supplemental damping), and b) using nonlinear fluid viscous dampers. Fragility curves are calculated from incremental dynamic analyses and considering three perception thresholds. Results show that for the building with viscous dampers the floor acceleration is reduced from 6.5 and 10.3 times with respect to that of the conventional building; in addition, the probability of exceeding the perception thresholds is reduced significantly.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño estructural de edificios de mediana y gran altura en la Ciudad de México está dominado normalmente por el efecto de las fuerzas laterales causadas por movimientos sísmicos; sin embargo, para edificios altos con una gran área expuesta localizados en ciertas zonas de la ciudad, la acción del

*Autor para correspondencia.

Dirección de correo electrónico: MSantosS@iingen.unam.mx, SRuizG@iingen.unam.mx, fvalenzuelab@uas.edu.mx

¹Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México

²Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México

viento puede ser significativa desde el punto de vista del diseño de los componentes no estructurales y del control de vibraciones que redundan en confort de sus ocupantes. En la literatura existen diversos trabajos orientados al estudio de los umbrales de percepción de la aceleración de piso [1,2], así como propuestas de métodos simplificados para estimar los valores de aceleración [3]. Los estudios mencionan que la vibración excesiva de los edificios ante efectos del viento, puede generar interrupción de las actividades de los ocupantes e incluso sensación de inseguridad.

Existen diferentes alternativas de solución para mitigar los efectos del viento en una construcción. Estas medidas incluyen: cambiar la geometría del sistema estructural, incrementar su rigidez lateral o incluir sistemas de control que permitan reducir la respuesta del sistema estructural [4, 5]. Estos últimos han sido ampliamente usados por su eficiencia en el control de la respuesta ante efectos de viento y pueden ser del siguiente tipo: a) masas resonantes sólidas o líquidas (tuned mass dampers or tuned liquid dampers) [6, 7, 8, 9] o b) dispositivos que proporcionen amortiguamiento suplementario adicional. En este estudio se utilizan los últimos debido a que también han mostrado su eficiencia para controlar las vibraciones inducidas por sismo y por viento [5, 10, 11], además, existen lineamientos para su diseño en la mayoría de los códigos de construcción [12,13,14,15].

El objetivo de este estudio es evaluar la fragilidad eólica de dos edificios, usando como medida de demanda estructural la aceleración máxima de piso, y con ello discutir la eficiencia de los dispositivos disipadores de energía en el control de la respuesta estructural producida por el viento en edificios altos. Para ello, se estudian dos variantes de un edificio de 28 niveles formado por marcos de concreto y acero en sección compuesta, que se localiza en la Ciudad de México. El edificio se considera equipado con amortiguadores viscosos no lineales, y alternativamente, sin ellos.

2. METODOLOGÍA

La metodología que se sigue se describe brevemente en los siguientes pasos:

1) Diseño estructural. El edificio se diseña de manera convencional (EC), y alternativamente, con dispositivos viscosos (DV); el diseño considera las acciones de sismo y viento, y se realiza de acuerdo con los lineamientos de la referencia [14].

2) Cargas dinámicas. Se simula un conjunto de señales correlacionadas en la altura para diferentes valores de velocidad de viento. Las señales de viento se transforman a señales de fuerzas usando la Ecuación 1.

$$F_i = -0.5 C_{Pi} A_i V_i(t)^2 \quad (1)$$

donde:

F_i es el vector de fuerzas asociadas al piso i , para una intensidad dada.

C_{Pi} es el coeficiente de presión o arrastre de acuerdo con la geometría y la dirección de análisis.

A_i es el área de expuesta al viento.

V_i es el vector que contiene la señal de viento asociada al piso i , para una intensidad de referencia t es el tiempo en segundos.

3) Análisis dinámicos incrementales. Se evalúa la respuesta del sistema estructural sometido a un conjunto de señales obtenidas en el paso anterior para velocidades de referencia de diferente intensidad.

4) Curvas de fragilidad. Se obtienen curvas de fragilidad, las cuales representan la probabilidad condicional de exceder un determinado nivel de la demanda estructural, dada la ocurrencia de una medida de intensidad, de acuerdo con la Ecuación 2 [16].

$$P(PDE > d | MI) = 1 - \Phi \left(\frac{\ln \left(\frac{d}{D} \right)}{\sigma_{\ln D}} \right) \quad (2)$$

donde:

MI es la medida de intensidad

Φ es la función de distribución normal acumulada

D , $\sigma_{\ln D}$ son la mediana de la demanda y la desviación estándar del logaritmo natural de la demanda, respectivamente.

En este estudio se selecciona la velocidad media del viento como medida de intensidad, y como parámetro de demanda se considera la aceleración máxima de piso, que se clasifica de acuerdo con los siguientes umbrales de percepción [2]:

a) No perceptible, para aceleraciones de piso menores a 5 mili-g

b) Perceptible, para aceleraciones de piso menores a 10 mili-g

c) Altamente perceptible, para aceleraciones de piso menores a 25 mili-g

3. ILUSTRACIÓN DE LA METODOLOGÍA

La metodología se aplica a dos edificios de 28 niveles (114m de altura) diseñados de acuerdo con el Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México y sus Normas Técnicas Complementarias (2017). Ambos edificios están constituidos por marcos de concreto y acero en sección compuesta; la única diferencia es que el primero tiene un sistema de amortiguamiento diseñado para reducir las aceleraciones y desplazamientos debidos a acciones de sismo en la dirección Y; el segundo es un edificio diseñado de forma convencional. En lo que sigue se estudia las ventajas que tiene usar el sistema de amortiguamiento para controlar las aceleraciones inducidas por el viento. Las Figuras. 1 y 2 muestran la planta del edificio, la elevación en el eje A, y la elevación en el eje 1, respectivamente.

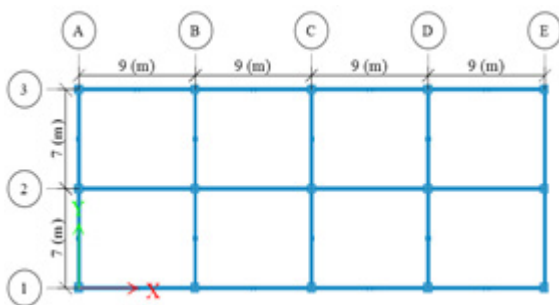


Figura 1. Vista en planta del edificio.

3.1 Diseño Estructural

Acciones Sísmicas

Para el diseño estructural se consideró un espectro de diseño sísmico de pseudo-aceleración correspondiente a suelo intermedio de la Ciudad de México (con un periodo dominante $T = 1$ s). Se usaron los siguientes parámetros (de las NTCD-Sismo-2017[14]):

Para el edificio equipado con dispositivos viscosos (DV):

- Se realizó un diseño preliminar usando un factor de reducción por amortiguamiento $\beta=0.52$ [14], el cual equivale a usar un espectro de diseño sísmico reducido con 22% de amortiguamiento crítico. Los detalles del proceso de diseño estructural se pueden consultar en las Refs. [11, 17].

El diseño estructural final se realizó usando análisis paso a paso no lineales.

Para el edificio convencional:

- Se consideró un valor de $Q=2$ para el factor de comportamiento sísmico y el de sobre-resistencia $R_0=1.75$, $k_1=1.0$ (dirección X), $k_1=0.8$ (dirección Y),

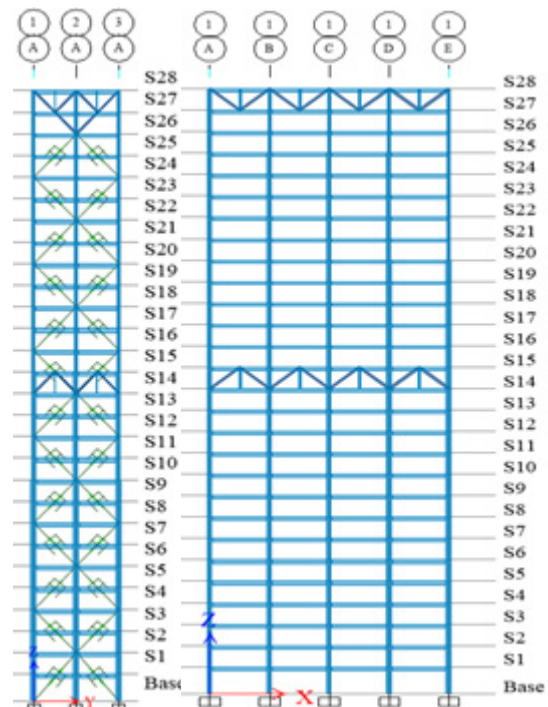


Figura 2. Elevación en el eje A y 1.

y k_2 de acuerdo con la ecuación 3.5.2 de las NTC-Sismo-2017[14].

- Los límites de distorsión de entrepiso permisible son iguales a 0.015 para el estado límite de colapso, y 0.004 para el estado límite de servicio.

Acciones de Viento

Los parámetros básicos para el diseño por viento de acuerdo con las NTCD-Viento-2017 [14] son los siguientes:

- Velocidad regional, $V_R = 30$ m/s (asociada a un periodo de retorno de 50 años)
- Velocidad regional correspondiente al estado límite de servicio, $V_R = 23$ m/s (asociada a un periodo de retorno de 10 años). Aceleración máxima de piso igual a 20 mili-g
- Terreno tipo 3 (terreno plano)
- Rugosidad del terreno tipo R4 (zona con gran densidad de edificios). La altura gradiente (δ) igual a 455m y exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura α igual a 0.170
- Factor de amplificación dinámica de acuerdo con la ecuación 5.0.1 de las NTCV-2017.
- Los coeficientes de presión considerados son: a) barlovento 0.8, b) sotavento -0.4, c) muros laterales -0.8 y d) -0.8 en techo

Las propiedades dinámicas del edificio se muestran en la Tabla 1.

3.2 Generación de Señales de Velocidad de Viento

Las señales de velocidades de viento se simularon usando el programa SVTpro [18], el cual usa un Modelo Autorregresivo de Media Móvil (ARMA por sus siglas en inglés) [19]. El programa correlaciona la señal de velocidades de viento a lo largo de la altura. Para los análisis, se simularon 10 conjuntos de señales de velocidad de viento, cada uno de ellos se compone por 28 registros de velocidades de viento con 10 minutos de duración. Para la simulación se requiere el perfil medio de velocidad del viento que tome en cuenta la rugosidad del terreno y el grado de exposición de la estructura, además de la función de densidad de potencia espectral (PSD) la cual sirve para simular la turbulencia del viento. En la Figura 3a se muestra la PSD de Kaimal, mientras que en la Figura 3b se presentan el perfil de velocidades de viento, así como dos historias de velocidades de viento generadas a 10 m y 114 m, las que resultaron de una simulación.

3.3 Análisis Dinámicos Incrementales

La variación de la demanda estructural (en este caso la aceleración máxima de piso) respecto a una velocidad de viento, se estima por medio de análisis dinámicos incrementales, en los que se estima la respuesta del sistema estructural a diferentes intensidades de viento y no sólo para dos periodos de retorno como comúnmente se realiza en los códigos de diseño. Las

Tabla 1. Propiedades dinámicas del edificio.

Modo de vibración	Dirección X		Dirección Y	
	Periodo (s)	Peso efectivo (%)	Periodo (s)	Peso efectivo (%)
1	4.79	78.2	4.5	75.6
2	1.69	8.7	1.53	11.4
3	0.9	5.6	0.79	5.2

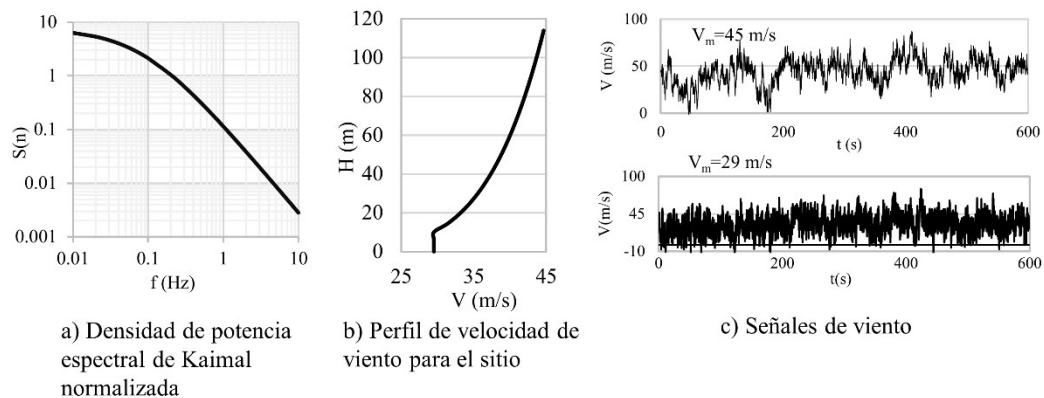


Figura 3. Características del viento en la altura.

velocidades de viento consideradas varían desde 10 hasta 44 m/s, con incrementos de 2 m/s, y corresponden a una altura de referencia de 10m. Los análisis paso a paso se realizaron en el programa ETABS [20], en el cual se realizaron las siguientes consideraciones: a) el sistema de amortiguamiento se modela explícitamente por medio de elementos tipo “link” con constante de amortiguamiento $C = 980.6 \text{ kN(s/mm)}^\alpha$ y $\alpha = 0.5$, b) el amortiguamiento inherente del sistema estructural se

modela mediante de una matriz de amortiguamiento de Rayleigh en donde todos los modos que contribuyen a la respuesta tienen una relación de amortiguamiento crítico menor a 1%.

Las Figuras 4 y 5 muestran los resultados de las historias de aceleración de piso para una simulación aleatoria con velocidades de viento de 23 y 31 m/s, respectivamente. En la Figura 4 se puede apreciar que en el edificio con dispositivos viscosos (DV) presenta

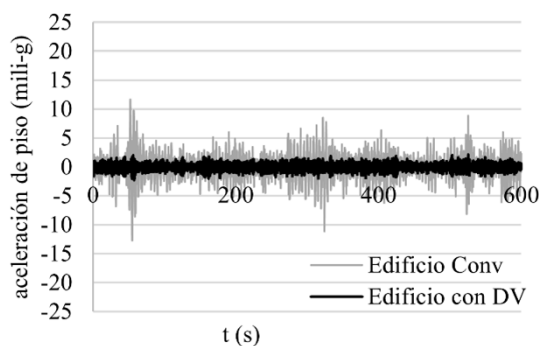


Figura 4. Historia de aceleraciones del nivel 28 para una $V=23$ m/s.

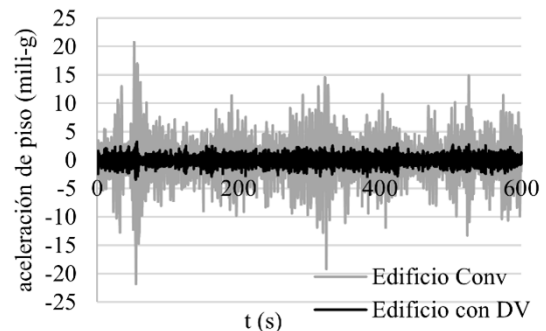


Figura 5. Historia de aceleraciones del nivel 28 para una $V=31$ m/s.

aceleraciones de piso hasta 6.5 veces menores que las del edificio convencional para una velocidad de viento de 23 m/s. De la misma forma, para una velocidad de viento de 31 m/s, las aceleraciones de piso son hasta 10.3 veces menores a las que presenta el edificio convencional (ver Figura 5), las relaciones fueron obtenidas en los picos de respuesta máxima del edificio convencional y en el mismo instante de tiempo. La Figura 6 muestra la respuesta de aceleración máxima del edificio convencional obtenida para 5 diferentes velocidades de viento. A partir de la Figura 6 se puede calcular la mediana y un parámetro de dispersión para

estimar la respuesta probabilista del sistema estructural asociada a cierta velocidad de viento.

3.4 Curvas de Fragilidad

Para el cálculo de las curvas de fragilidad se considera que la variación de la demanda estructural con la intensidad sigue una distribución de tipo lognormal [21]. Estas se expresan como función de la velocidad de referencia del viento y se calculan para los umbrales de percepción mencionados en la sección 2. La Figura 7 muestra las curvas de fragilidad de los dos sistemas estructurales en estudio, para los tres umbrales de percepción. A partir de estas curvas se pueden realizar los siguientes comentarios:

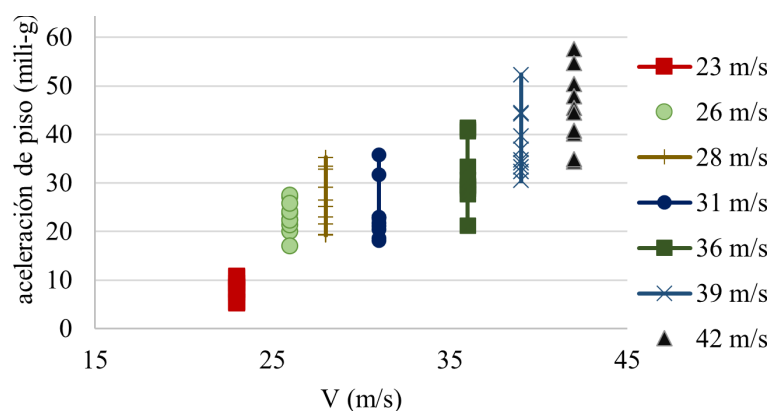


Figura 6. Aceleraciones máximas de piso para el edificio convencional.

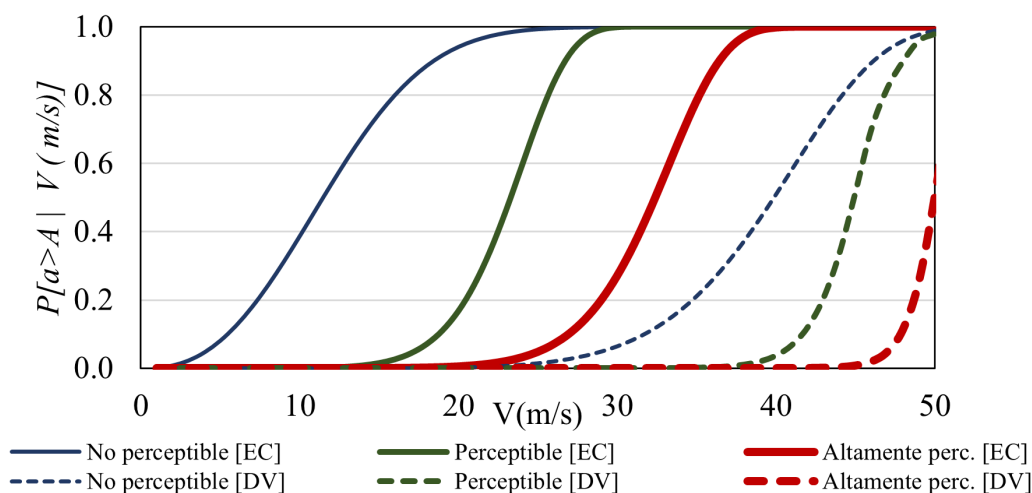


Figura 7. Curvas de fragilidad de percepción.

1. Las curvas de fragilidad del edificio equipado con dispositivos viscosos (líneas gruesas interrumpidas) tienden a ubicarse hacia la derecha respecto a las curvas del edificio convencional (líneas continuas). Esto indica que se requiere una intensidad mayor para exceder los umbrales de percepción establecidos.

2. Para una velocidad de viento de 23 m/s (velocidad para revisar es estado límite de servicio), existe una probabilidad del 46% de que la aceleración pueda exceder 10 mili-g, o bien, que el movimiento debido a la aceleración sea perceptible en el edificio convencional, mientras que para el edificio con DV la probabilidad de exceder el mismo umbral de percepción es 0%. De forma similar, para una velocidad de viento de 30 m/s (velocidad de diseño para la revisión de la seguridad contra colapso) existe una probabilidad del 27% de que la aceleración inducida por el viento sea altamente perceptible, por otro lado, en el edificio con DV apenas alcanza una probabilidad de 6.5% de exceder el umbral “no perceptible” para la misma velocidad de viento, esto indica que cuando el edificio con DV se encuentre sometido a altas velocidades de viento el movimiento será imperceptible.

4. CONCLUSIONES

Se presentó una comparación de la fragilidad de dos sistemas estructurales en términos de la aceleración inducida por el viento. El edificio analizado se localiza en la Ciudad de México y se consideró con dispositivos viscosos, y alternativamente, sin ellos. Las principales conclusiones de este estudio son las siguientes:

1) Las curvas de fragilidad muestran que la probabilidad de excedencia de un cierto umbral de percepción, asociado a un nivel de velocidad de viento, es menor para un edificio equipado con DV que para uno con las mismas características, pero diseñado de manera convencional.

2) Los resultados indican que el edificio equipado con amortiguadores viscosos presentará un mejor comportamiento estructural que el edificio convencional bajo las acciones de viento que se esperan que ocurran en ese sitio en el futuro. La evaluación de los edificios se realizó en términos de la aceleración de piso, no obstante, la inclusión de dispositivos de amortiguamiento puede, además, reducir los desplazamientos laterales y los elementos mecánicos en los elementos estructurales.

3) Se espera que las curvas de fragilidad correspondientes a otras estructuras equipadas con amortiguadores sigan una tendencia similar a las mostradas en la Figura 7. La probabilidad de excedencia de un determinado parámetro de demanda estructural asociado a un nivel de intensidad dependerá de las características dinámicas de la estructura y del nivel de peligro eólico del sitio.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para sus estudios de posgrado. Esta investigación tuvo apoyo de la DGAPA-UNAM bajo el proyecto PAPIIT-IN100320.

REFERENCIAS

1. Pozos-Estrada A., Hong H P., Galsworthy J K. Serviceability design factors for wind-sensitive structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 37, 2010, p. 728-738.
2. Tamura Y, Kawana S, Nakamura O, Kanda J, Nakata S. (2006). Evaluation perception of wind-induced vibration in buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings*, paper 14507, Issue SB5, 2006, p. 283-293.
3. Pozos-Estrada, A. A simple procedure to evaluate the wind-induced acceleration in tall buildings: an application to Mexico. *Wind and Structures*, Vol.27, No. 5, 2018, 337-345, DOI: <https://doi.org/10.12989/was.2018.27.5.337>.
4. Yang J., Agrawal A. K., Samali B., Wu J. Benchmark problem for response control of wind-excited tall buildings, *Journal of Engineering Mechanics*, Vo. 130 (4), 2004, p. 437-446.
5. Santos-Santiago M. A., Ruiz S. E., Valenzuela-Beltrán F. Multihazard risk assessment (seismic and wind) for buildings with dampers in Mexico City. *Proceedings of the 11th National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Los Angeles, CA 2018*.

6. Rüdinger F. Tuned mass damper with nonlinear viscous damping, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 300, 2007, p. 932-948.
7. Giaralis A., Petrini F. Wind-induced vibration mitigation in tall buildings using the tuned mass-damper-inerter. *Journal of Structural Engineering* Vol. 143 (9):04017127, 2017.
8. Pozos-Estrada A., Hong H. P. Sensitivity analysis of the effectiveness of tuned mass dampers to reduce the wind-induced torsional responses. *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 12, 2015, p. 2520-2538.
9. Soto-Brito R., Ruiz S. E. Influence of ground motion intensity on the effectiveness of tuned mass dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 28, 1999, p. 1255-1271.
10. Santos-Santiago, M. A., Ruiz S. E., Valenzuela-Beltrán F. Wind-induced vibration control of buildings equipped with non-linear viscous dampers, *Vibroengineering PROCEDIA*, Vol. 21, 2018, p. 119-124. <https://doi.org/10.21595/vp.2018.20315>.
11. Zhiqiang Z., Aiqun L., Jianping H., Jianlei W. Wind-induced vibration control of Hefei TV tower with fluid viscous dampers. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, Vol 3, 2009, p. 249-254.
12. ASCE SEI 7-16. Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers, 2016, p. 181-196.
13. Constantinou M., Symans M. Experimental and analytical investigation of seismic response of structures with supplemental fluid viscous dampers. Technical Report NCEER-92-0032. 1992.
14. Gobierno de la Ciudad de México, Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México y sus Normas Técnicas Complementarias, 2017.
15. Ruiz S. E. Review of guidelines for seismic design of structures with damping systems, *The Open Civil Engineering Journal*, Vol. 12, 2018, 195-204.
16. Cornell A., Jalayer F., Hamburger R., Foutch D. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines, *Journal of Structural Engineering*, vol. 128 (4), 2002, p. 526-532.
17. Santos M. A., Ruiz S. E., Santos A., Valenzuela F. Comparación de dos métodos simplificados para el diseño de edificios con amortiguadores viscosos no-lineales. XXI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 2017.
18. Ortégón J, Pozos A. Educational software for wind engineering applications on structures. 6th Structural Engineers World Congress, 2017. <https://proyectos.iingen.unam.mx/genesissimvt-svtpro/es-mx/Paginas/default.aspx>
19. Samaras E., Shinozuka M. ARMA Representation of random processes. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 111 (3), 1985, p. 449-461.
20. Computer and Structures, ETABS V16.2.1, 2016. Berkeley California.
21. Bernardini E, Seymour M, Spence J, Dae-Kun K, Kareem A. Performance-based Design of High-Rise Buildings for Occupant Comfort. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 141(10): 04014244, 2015.

Water efficiency scenarios for green commercial buildings in Mexico and related CO₂ emissions mitigation

Escenarios de consumo de agua para edificios verdes de uso comercial en México y sus emisiones de CO₂

Montserrat Serrano-Medrano¹ and Alissa Kendall²

RESUMEN

En este estudio se evalúan las oportunidades de eficiencia de agua en edificios verdes de uso comercial en México, por medio de tres escenarios para estimar las reducciones potenciales en consumo de agua potable, consumo de energía, y emisiones de CO₂ hasta el año 2050. Los escenarios incluyen (1) un escenario base donde la tasa de uso de agua corriente permanece estática, (2) un escenario donde las nuevas construcciones adoptan el Código de Normas de Construcción Ecológica de California (Calgreen), y (3) un escenario donde las nuevas construcciones adoptan medidas adicionales al Calgreen (CalgreenPlus). El consumo de agua en el sector comercial puede alcanzar alrededor de 4,099 millones, 2,900 millones y 2,700 millones de metros cúbicos en los escenarios base, Calgreen y CalgreenPlus, respectivamente. Lo anterior representa un 29% y 32% de reducción en consumo de energía comparados con el escenario base. Reducciones en emisiones de 1.3 millones de ton de dióxido de carbono (tCO₂) y 1.4 millones de tCO₂, así como ahorros monetarios equivalentes a 44% y 50% del presupuesto de México para educación superior, se pueden alcanzar a partir de implementar los escenarios Calgreen y CalgreenPlus, respectivamente.

Recibido: septiembre 2019

Aceptado: febrero 2020

Publicado: junio 2021

ABSTRACT

Palabras Clave:

Edificios verdes, eficiencia de uso de agua, emisiones de CO₂, huella de carbón.

Keywords:

Green buildings; water efficiency; energy efficiency; CO₂ emissions; carbon footprint.

This study evaluates green commercial building water efficiency opportunities in Mexico through three scenarios to estimate potential reductions in potable water consumption, energy consumption, and CO₂ emissions through the year 2050. The scenarios include (1) a baseline scenario where current water use rates remain static, (2) a scenario where new constructions adopt the 2010 California Green Building Standards Code (Calgreen), and (3) a scenario where new constructions adopt additional measures to Calgreen (CalgreenPlus). In 2050 water consumption in the commercial sector would reach about 4,099 million, 2,900 million, and 2,700 million m³ in the baseline, Calgreen and CalgreenPlus scenarios, respectively. Reductions reached are equivalent to about 100% of the current annual water consumption of Mexico City. Energy consumption related to water use is estimated to reach 7 TWh, 5 TWh, and 4.7 TWh, for the baseline, Calgreen, and CalgreenPlus scenarios, respectively. This represents a 29% and 32% energy consumption reduction in the saving scenarios compared to the baseline scenario. Emissions reductions of 1.3 million t carbon dioxide (tCO₂) and 1.4 million tCO₂, as well as monetary savings equivalent to 44% and 50% of Mexico's budget for higher education would be achieved from implementing the Calgreen and CalgreenPlus scenarios, respectively.

1. INTRODUCTION

Water supplies for drinking and sanitation are critical for the health and welfare of human populations particularly in urban environments. Yet approximately twenty percent of the world's population face water scarcity today, and water demand continues to rise in growing urban and industrial systems leading to the

*Autor para correspondencia. Montserrat Serrano-Medrano

Dirección de correo electrónico: mserrano@cieco.unam.mx

¹ Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, 58190, Morelia, Michoacán, México.

² Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California, One Shields Ave., Davis, CA 95616, USA

potential for even greater water scarcity in the future, particularly at local scales (UN Water and FAO, 2007). In addition, climate change is likely to increase the severity and frequency of water shortages, so unless water systems and water use become more efficient, water scarcity is likely to increase significantly over time.

Mexico faces many of these challenges. The country encountered a severe drought in 2009 with significant consequences, including considerable reductions in the potable water supply to its largest cities. For example, the Sistema Cutzamala, a system of dams from which Mexico City depends on 20% for its potable water, reduced flows by 30% during the drought (Sistema Meteorológico Nacional, 2009). Groundwater has historically been used to meet the city's water demand as well. However, the city has exceeded the limit of sustainable groundwater withdrawal rates, as evidenced by dramatic subsidence in some areas of the city.

These shortages and constrained supplies are occurring as Mexico's demand for water continues to increase. Mexico's public water consumption has increased from about 8,400 million m³ in 1998 to 10,300 million m³ in 2003 to 11,200 million m³ in 2007 (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2004, Comisión Nacional del Agua, 2008a). The public supply sector, which integrates all the water delivered by the potable water distribution system, accounted for 14% of water use in the country. Of this 14%, non-residential use accounted for about 18%, or 2,250 million m³ (Comisión Nacional del Agua, 2008a).

Given the conditions of constrained supplies, rapid urbanization, and increasing potable water demand, understanding current water use in the built environment as well as identifying opportunities to improve efficiency can help to mitigate the effects of climate change on water availability. However, many countries, particularly those categorized as developing nations, lack detailed information about their building stock and water use in buildings. For example, there is no inventory or reliable estimate of the existing non-residential building stock, nor is there reliable database documenting the performance of the existing building stock in Mexico (Adelaar et al., 2008). This lack of information makes it difficult to design, implement and evaluate efficient potable water management practices in non-residential buildings.

This study attempts to improve the availability of information on water use in buildings by estimating water use in non-residential buildings in Mexico. This effort requires that, first, the commercial building stock be estimated, then water use rate for different building types be estimated, and finally that current and future water use be estimated under different water consumption scenarios. To date Mexico has only limited standards regarding water use efficiency. Shower head specifications (NOM-008-CNA-1998), and toilet specifications (NOM-009-CAN-1998) are the only regulations that currently affect water efficiency practices in buildings (Comisión Nacional del Agua, 2008a), so a number of additional water efficiency standards and approaches are considered.

The goal of this study is to estimate current and future water use in commercial buildings under a number of different policies for water efficiency standards which could be implemented in new buildings. The effectiveness of enhanced water efficiency standards are tested by developing three scenarios: a baseline scenario where no changes to current water use rates occur; a scenario where water efficiency standards implemented in the 2010 California Green Building Standards Code, or Calgreen, are adopted in Mexico (California Building Standards Commission, 2010); and a third scenario where additional efficiency actions beyond the Calgreen standard are implemented, referred to as CalgreenPlus.

2. METHODS

2.1 Estimation of commercial building stock

Commercial building stock data in Mexico is very limited. This gap in data for the number of building units and their floor area has been identified in previous studies (Adelaar et al., 2008, de Buen, 2009).

The most recent estimation, developed by de Buen (2009), used a variety of data sources such as the websites of chambers of commerce and business associations. De Buen presented building information in terms of building type and estimated floor area, relying on several key assumptions to generate a reasonable, but conservative, approximation. The building types included in de Buen's study were aggregated in the following service sectors: (1) warehouses, (2) hotels and restaurants, (3) office buildings, (4) wholesale and retail buildings, (5) theaters and recreational facilities, (6) hospitals and health facilities, and (7) schools.

Table 1 shows the estimated area for each building sector.

2.2 Water use by building type

Mexico lacks data on end-uses of water in commercial buildings. The most detailed report available regarding potable water in Mexico states that non-residential use accounted for 18% of potable water use in 2003. Non-residential uses included commercial, industrial, public services, and “other” subsectors with a contribution of 10.8%, 3.7%, 3%, and 0.5%, respectively (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2004). The “public service use” and commercial subsectors are combined in this analysis to capture commercial buildings in public service (i.e. schools, hospitals, etc.). The “other” subsector includes water users that, for example, obtain water by tankers. Because the “other” subsector generally supplies residential segments where no potable water distribution services exist, and the “industrial use” is

not part of the commercial building sector, these are excluded from this analysis.

The “public service use” subsector includes public offices, government buildings, schools, and irrigation water for parks and public gardens. Irrigation water use is excluded since only building water use is considered. Thus, the percent of “public service use” water consumption is decreased by 0.5%. This is a conservative reduction percentage because irrigation is not a daily task in most of the parks across the country, and therefore its contribution to the public service use is far less significant than the other uses included in this subsector.

Data on non-residential water consumption from the year 2008, as reported in de Buen (2009), is used in this study and is combined with the breakdowns identified for the year 2003, since no detailed breakdown is available for 2008 water use. Thus the water consumption rate for commercial buildings is estimated at 1210 million m³, and public service uses, excluding parks and recreation areas, is 280 million m³.

Table 1. Estimated total building area by building service sector.

Type of building	Total building area
	(million m ²)
Warehouse	5.0
Hotels & Restaurants	14.0
Office Buildings	4.6
Wholesale & Retail	15.2
Theatres & Recreational Facilities	2.8
Hospitals & Health Facilities	6.0
Schools	121.0
Other buildings	110,000,000
TOTAL	278,600,000

Source: Adapted from (de Buen, 2009)

There is little or no information regarding average water use per type of building, and even less on water end-uses in the country. For this reason and because a considerable area of Mexico has a similar climate to that in California, data on commercial and institutional building water use in California generated by the AWWA Research Foundation were used as substitute values for Mexican commercial buildings (Dziegielewski et al., 2000). Some modifications were done to incorporate clear differences between Californian and Mexican buildings, however.

The AWWA collected water use data from direct field measurements in buildings located in four different locations in California: Irvine, Los Angeles, San Diego, Santa Monica; and one location in Phoenix, Arizona. Data from this report distinguishes between annual and seasonal uses; however, only annual use is considered for Mexican buildings. Because of the dissimilar classification of building type between the AWWA study and the Mexican classifications, the AWWA categories had to be mapped to the Mexican building classifications. The following describes how the AWWA report was adapted to estimate water consumption for Mexican buildings.

1. Warehouses are not studied by the AWWA report therefore potable water consumption is considered to be 20% of the estimated average consumption of the building type with the lowest value in the AWWA report - schools. There is a significant difference between water uses in warehouses, where there are few people, compared to other commercial buildings.

2. Office buildings, theaters, and recreation facilities were grouped into the same "Office Building" category because, generally, these places are likely to involve similar consumptive water uses, such as lavatories without showers, and limited or no food preparation.

3. Hotels and hospitals were grouped into the same "Hotels" category because, in general, similar water uses take place in both facilities. For instance, personal hygiene and laundry activities as well as food preparation. There are some possible exceptions, such as swimming pools available in some hotels (though they recycle water), and extra washing required in hospitals (gowns, curtains, etc.).

Direct field measurements from the AWWA report are classified into three different end-uses: indoor use,

continuous use, and outdoor use. These three end-uses were disaggregated further according to the type of building.

Several additional assumptions were required in order to adapt AWWA's data on water consumption. For instance, ice machines which were considered in hotels in AWWA's study were eliminated from the same sector in Mexico because, generally, ice is delivered by companies. In addition, because water fountains are uncommon in Mexican buildings, water use reported for water fountains in the AWWA report was omitted.

In contrast, some other uses were assumed to increase. Continuous uses such as leaks were considered as twice the value reported from AWWA study data because maintenance rates in Mexico are generally very low (Comisión Nacional del Agua, 2008b). Also, shower, cooling and swimming pool uses in schools were assumed to be zero because these amenities are rarely provided.

Finally, the "other buildings" category comprises nearly 40% of the building stock area, yet little is known about the services provided and thus the water consumed. For the results presented in this study, water consumption is assumed to be the median of all other building types. However, because there is high variability among building types, this assumption is a significant source of uncertainty and therefore it may affect the final results. Thus, a sensitivity analysis is included to assess the influence of this assumption.

3. RESULTS

Taking into account the commercial building stock mentioned above and the estimated average potable water use in commercial buildings, the total potable water consumption in 2008 for each type of building is shown in Table 2.

The "other services" sector is the main contributor to 2008 potable water consumption followed by hotels, schools; wholesale, retail, and supermarkets; office buildings; and restaurants. However, if the other services sector is left out of the analysis; the contribution of hotels and schools is considerable. In both cases, with and without the other services sector included, it is clear that although restaurants have the largest water consumption per m², their contribution to the total water consumption by the commercial sector is one of the lowest (just above warehouses) due to their small total floor area. On the other hand, regardless of

Table 2. Total potable water consumption for building type for 2008.

Type of building	Consumption (m ³ /m ² -year)	Total building area (Mm ²)	Total use (Mm ³)	Percentage contribution
Warehouses*	0.296	5.0	1.478	0.2
Office buildings	4.898	7.4	36.244	3.8
Restaurants	17.704	2.0	35.408	3.7
Whole sale, retail, and supermarkets	2.728	15.2	41.467	4.3
Hotels	13.754	18.0	247.579	25.8
Schools	1.478	121.0	178.845	18.6
Other services**	3.813	110.0	419.426	43.7
Total		278.6	960.447	100.0

*Warehouses consumption value (in m³/m²-year) was assumed to be 20% of the lowest estimated potable water consumption value; this is the schools' value.

**Other services consumption value was assumed to be the median of the other 6 types of buildings' values.

schools' low water consumption per floor area, their important contribution to the total water consumed is attributable to their large built area.

Total potable water consumption by building type can be broken down into the following end-use categories: irrigation, leaks, cooling, toilets/urinals, faucets, other indoor uses, and a miscellaneous category referred to as 'other'. The 'other' category includes end-uses such as dishwashing for restaurants as well as bathtubs, showers, laundry, and swimming pools for hotels. The end-uses and their contribution to the total average potable water consumption vary significantly between each building category, as illustrated in Figure 1. The 'Other' building category is not included in Figure 1, because data regarding end-uses in this building category were not available.

On a per-floor area basis, there are significant differences between buildings types. Indoor uses are

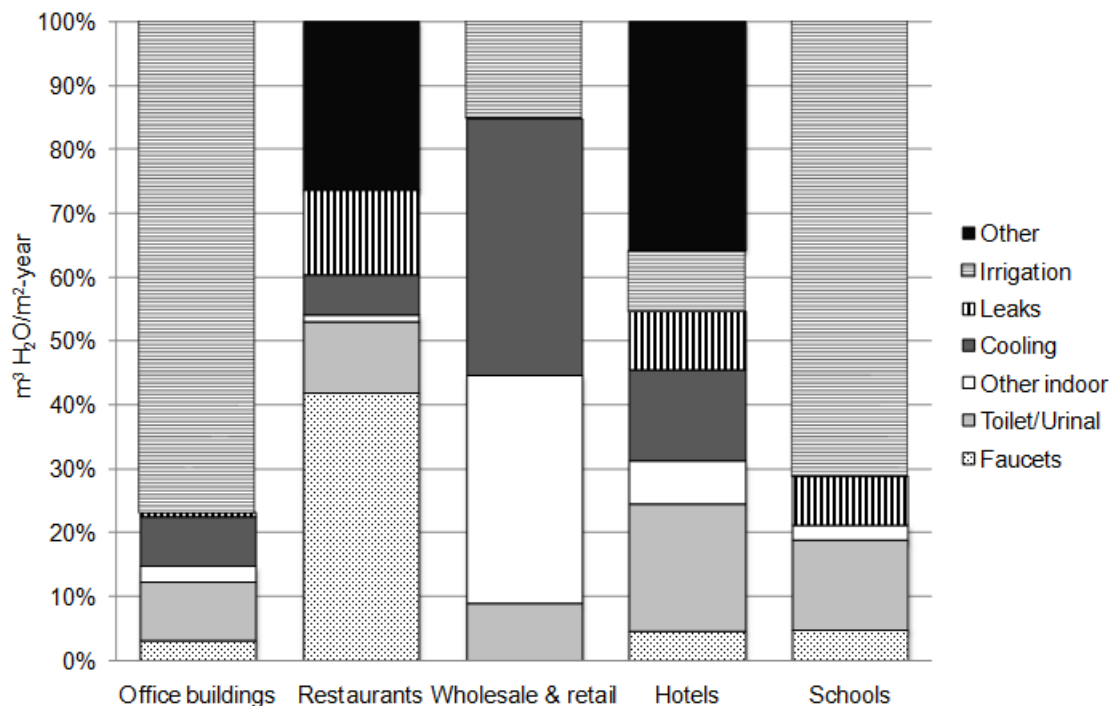
the main contributors to water consumption in restaurants, wholesale and retail, and hotels. On the other hand, irrigation for landscaping has a large impact on water consumption for office buildings and schools.

4. SCENARIO ANALYSIS

A baseline water consumption project and two other scenarios are assessed over the period from 2008 to 2050. Despite its important contribution to commercial building water consumption, the 'other' building category is not included in the scenario analysis due to its high level of uncertainty.

The baseline scenario for the commercial building uses the current estimated potable water consumption rate overlaid with a growing stock of commercial buildings in Mexico. De Buen estimated a growth rate per year of about 4% for warehouses, hotels,

Figure 1. Proportion of water consumption by end-use.



restaurants, office buildings, and whole sale, retail, and supermarkets; and a growth rate of about 3% for schools, and the other services sector (de Buen, 2009). These growth rates were defined to establish a baseline for energy use in commercial buildings that would match with Mexico's Secretaría de Energía (SENER) projections. Applying these growth rates to the building area for the specified building types, the baseline scenario predicts that 2050 water consumption in the commercial sector will reach about 4,099 million m³, as shown in Figure 2.

The Calgreen profile was calculated by combining the mandatory and voluntary reductions established by the 2010 California Green Building Standards code (California Building Standards Commission, 2010). These measures establish a mandatory 20% reduction in the non-residential indoor water use and a 50% voluntary reduction in the outdoor water use. Indoor overall use of potable water will be reduced by means of providing the building with plumbing fixtures (e.g. water closets and urinals) and fittings (e.g. faucets and showerheads). Outdoor water use could be reduced by means of, but not limited to, the following methods:

preferring low-irrigation coefficient plants; irrigation efficiency and distribution uniformity; use of captured rainwater; use of recycled water; and water treated for irrigation purposes and conveyed by a water district or public entity. These measures are set forth in Chapter 5-Division 5.3 and Appendix A5- Division A5.3 of the Calgreen code. The estimated consumption, with these adopted reductions, is then correlated with the projected building stock growth to yield the water consumption profile shown in Figure 2. Water consumption in the Calgreen scenario would reach about 2,898 million m³ in the 2050. This represents about 1,200 million m³ saved or about a 29% reduction with respect to the baseline figure.

An important factor contributing to water consumption in the commercial sector in Mexico is consumption related to leaks. Leaks have a great impact considering that maintenance rates are low in Mexico. For instance, due to the lack of maintenance in the potable water distribution system, losses from leaks can reach 50% (Comisión Nacional del Agua, 2008b). Hence, the CalgreenPlus scenario considers an 80% reduction in water lost in leaks in addition

to the Calgreen scenario considerations in order to achieve a 10% leak rate, the average leak rate in USA utilities (ONTAP, 2005). Figure 2 shows that the water consumed in this scenario would reach about 2,754million m³ in 2050. This represents about 1,350 million m³ saved or about a 33% reduction compared to the baseline conditions scenario.

5. Estimation of co-benefits: CO₂ emissions reductions

Potable water consumption savings confers co-benefits in the form of reduced electricity and related CO₂ emissions. Electricity consumption related to potable water use includes electricity for pumping and treating water as well as electricity consumption due to wastewater treatment and collection. Thus, total electricity consumption associated to potable water use was estimated with the following equation:

$$TEC = ESEC + ISEC + FDEC$$

Where TEC is the total electricity consumption used to supply and treat potable water and to collect

and treat wastewater; ESEC is the electricity consumption used for “external” water sources supplying urban centers (i.e. electricity used for pumping and/or to treat water from reservoirs); ISEC is the electricity consumption used for internal water sources supplying urban centers (i.e. electricity used for pumping from wells or springs); and FDEC is the electricity consumption required for wastewater treatment and collection.

The electricity consumption per m³ for each of the three different water-use categories was estimated by examining the following cities: Mexico City, Monterrey, Morelia and Pátzcuaro. These cities were selected because of 1) information availability, 2) they account for about 30% of Mexico’s total population and 3) because they are also representative of a range of typical city sizes in Mexico (very big, big, and medium) where commercial building are located. Very small cities have few commercial buildings. Information from direct sources (i.e. by means of surveys to municipal water boards) was obtained for Morelia and Pátzcuaro (OOAPAS Mo-

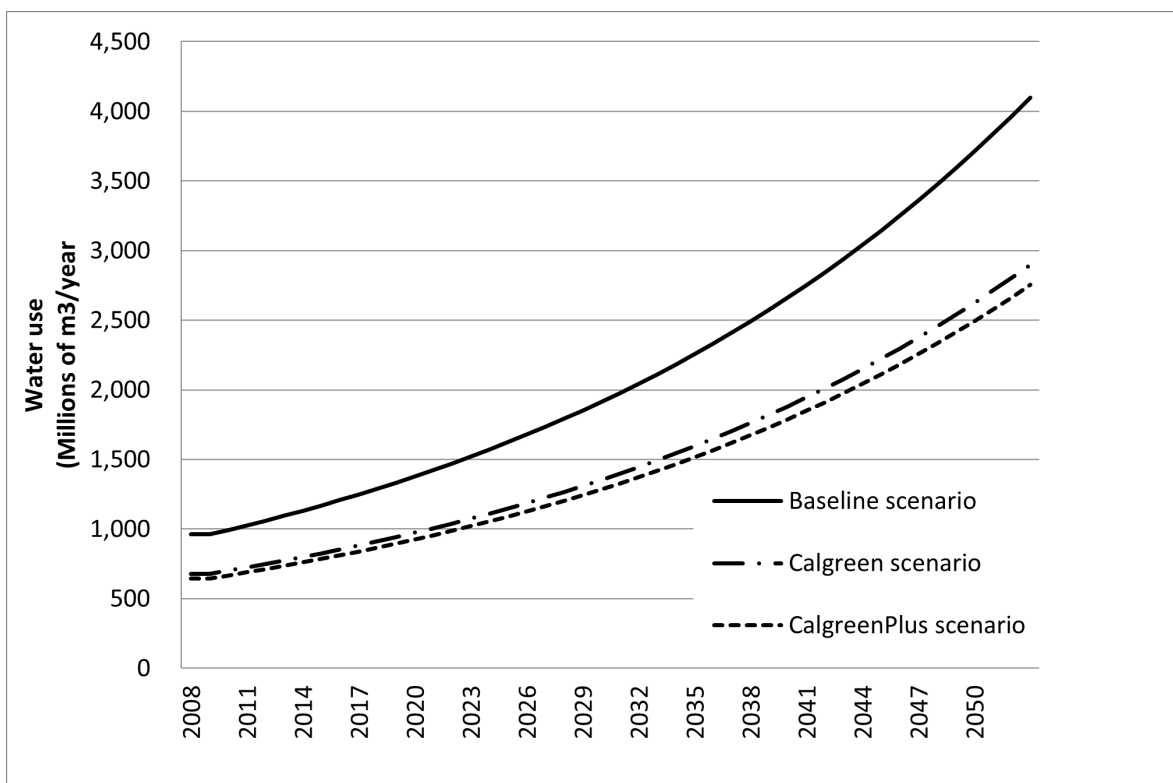


Figure 2. Evolution of Potable Water Consumption for Baseline, Calgreen, and CalgreenPlus Scenarios for new commercial buildings (2008-2050).

relia, 2010, OOAPASP, 2010); and reports regarding electricity consumption for water supply and treatment were available for Mexico City and Monterrey (Breceda-Lapeyre, 2004, James, 2003). Information derived from direct surveys is based on monthly bills for electricity consumption at each treatment or water supply plant, while information available from reports is based on average electricity consumption.

TEC was estimated taking into account a mean value to a) treat and pump water and another mean value to b) treat and collect wastewater from the cities mentioned above. As a result, estimated values were of the order of 1.65 kWh/m³ and 0.11 kWh/m³, respectively. These two mean values are only a rough estimate due to variability in electricity use for potable water systems and water treatment across the country.

Applying the electricity intensity values for potable water and wastewater volume projections, emissions of CO₂ due to energy consumption can

be calculated using the IPCC Methodology (IPCC, 2006):

$$CO_{2E} = \sum CEF_e e$$

Where CO_{2E} are the CO₂ emissions related to energy consumption, CEF_e is the CO₂ emissions factor for electricity generation, and e is the total electricity consumption. This factor is dynamic over time because its estimation relies on factors such as the proportion of all the primary energy sources to produce electricity and the efficiency of the power generation. Rosas et al. (Rosas et al., 2010, Rosas-Flores et al., 2011) recently estimated this CEF factor to be 178.8 t CO₂/TJ or 0.64 t CO₂/ MWh for 2006 for Mexico. Table 3 reports electricity consumption for potable water use and wastewater treatment, as well as the CO₂ emissions from electricity use for the baseline, Calgreen, and CalgreenPlus scenarios for 2050.

Table 3. Estimated electricity consumption for potable water use and waste water treatment, and CO₂ emissions-reductions for 2050.

Potable Water consumption	(Mm ³)	Baseline	4,099
		Calgreen	2,898
		CalgreenPlus	2,754
Percentage of water going to wastewater treatment*	(%)	Baseline	0.5
		Calgreen	0.6
		CalgreenPlus	0.7
Total electricity consumption for potable water use and disposal	(TWh)	Baseline	6.9
		Calgreen	4.9
		CalgreenPlus	4.7
CO₂ emissions	(MtCO ₂)	Baseline	4.5
		Calgreen	3.2
		CalgreenPlus	3.0

*Percentage of water going to wastewater treatment was estimated by ignoring the volume of leaks and irrigation applications included in the potable water consumption.

6. ECONOMIC IMPLICATIONS

As a consequence of water and electricity consumption reductions, economic savings from water efficiency actions could also be achieved. From the customer's perspective, there is a high variability in the cost of potable water across the country. Each municipality establishes its own customers' rates depending on user type (i.e. residential, commercial, and public, etc.) and a range of volumetric consumption per billing period (i.e. low, medium, and high). There are also many locations where a fixed price is used to charge for potable water consumption because many users lack water meters (POGM, 2010). Potable water costs for utilities in Mexico are generally higher than rates charged to consumers, because many of these

utilities are run by local governments that absorb part of total costs. Therefore, the consumers' cost reduction estimation was done using an average of \$2.3 USD/m³ based on rates from several municipal potable water boards (Grajeda, 2009, SAPDM, 2011, POGM, 2010). Table 4 shows the financial savings in the Calgreen scenario and CalgreenPlus scenario with respect to the baseline scenario for 2050.

Monetary savings may also be realized for reduced electricity consumption resulting from decreased potable water use and treatment, thus utilities could also benefit from efficiency measures. This does not necessarily imply that they will pass along these cost reductions to the customer (for example they can use them to fund infrastructure improvements). Accordingly to the Federal Electricity Board (CFE,

Table 4 Consumers' financial savings for water consumption reduction in 2050.

Costs to consumers for potable water use			Cost reductions to consumers	
(Million dollars)			(Million dollars)	
Baseline	Calgreen	CalgreePlus	Calgreen	CalgreenPlus
9,427	6,665	6,333	2,762	3,094

its acronym in Spanish), the cost per kWh for Service type 6 (potable and wastewater pumping) was on the order of USD\$ 0.11/ kWh for October 2010 (CFE, 2010). Table 5 shows the financial savings due to a decrease in electricity consumption for potable water consumption reduction concept.

If monetary savings from water consumption reduction to consumers and from electricity consumption reduction for utilities are summed, total savings may reach about 2,900 million dollars and 3,200 million dollars for the Calgreen and CalgreenPlus scenarios in 2050, respectively.

7. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Due to the lack of available primary data, a model was developed to estimate potable water consumption in commercial buildings. Commercial building potable water consumption for 2008 was estimated to be close to 1 billion m³. To put this in context, this value represents almost the total current potable water consumption of Mexico's largest city, Mexico City.

The baseline scenario shows that by 2050 commercial buildings potable water consumption would reach about 4.1 billion m³. Potential reductions to the

Table 5 Total financial savings for electricity consumption reduction in 2050.

Electricity consumption costs for water utilities			Cost Savings	
(Million dollars)			(Million dollars)	
Baseline	CalGreen	CagreenPlus	Calgreen	CagreenPlus
769	547	521	222	248

baseline scenario consumption are assessed in the Calgreen and CalgreenPlus scenarios. The Calgreen scenario shows that in 2050 commercial building water consumption would reach about 2.9 billion m³. This represents a 29% reduction in potable water consumption, or about 1.2 billion m³ saved compared to the baseline scenario. The CalgreenPlus scenario shows that in 2050 commercial building water consumption would reach about 2.7 billion m³. This represents about a 33% reduction in potable water consumption, or about 1.4 billion m³ saved. Reductions reached by these scenarios are similar in magnitude to the total 2008 commercial building water use in Mexico. With respect to energy savings from electricity, approximately 2 million MWh and 2.3 million MWh would be saved in 2050 for the Calgreen and CalgreenPlus scenarios, respectively. In addition, about 1.3 million and 1.4 million t CO₂ in 2050 would be saved for the Calgreen and CalgreenPlus scenarios, respectively. This represents a reduction of about 29% and 32% for the electricity consumption and consequent CO₂ emissions compared to the baseline scenario.

The approximate 2,900 million dollars in savings for the Calgreen scenario and 3,200 million dollars in savings for the CalgreenPlus scenario for 2050 demonstrate monetary saving compared to the baseline of 29% and 32%, respectively. These monetary savings are not inconsequential at a national scale. For example, these savings are equivalent to between 44% and 50% of Mexico's current annual budget for higher education.

Nevertheless, it is worth emphasizing that these savings do not account for the cost of implementing the water saving scenarios. Including leak reduction through improved maintenance in the CalgreenPlus scenario, which could be costly. So, further analysis need to assess the cost of implementing either the Calgreen or CalgreenPlus scenarios.

Base on the results obtained in this study, the following recommendations are provided:

1. Establish a reliable commercial building database, by means of government resources; for example, through the Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. The database should contain attribute information such as building type, building stock, floor area, age, and water consumption rates.
2. Engage in data collection efforts to determine water end-uses by type of building to establish a baseline for the current building stock.
3. Promote legislation that encourages the adoption of green building practices, like Mexico City's, "Programa de Certificación de Edificaciones Sustentables" (PCES, 2008) throughout the country. This voluntary program was launched on 2008 and made effective in 2009. It is similar structure and content to the US Green Building Council's LEED certification system (USGBC, 2012). LEED provides green building certification at multiple levels based on credits (or points) earned based on building design,

construction and/or operation. For example, LEED water efficiency points can be achieved through

1) water use reduction by means of increasing water efficiency within buildings (required reduction percentages range from 30% to 40%), by implementing potential technologies such as high-efficiency fixtures (e.g., water closets and urinals) and dry fixtures such as dry toilets;

2) the use of water-efficient landscaping to limit or eliminate the use of potable water for landscape irrigation, for example by planting native or drought tolerant plants to reduce or eliminate irrigation; and

3) the use of innovative wastewater technologies to reduce wastewater generation and potable water demand by means of, but not limited to, high-efficiency fixtures and dry fixtures and the use of on-site wastewater treatment (USGBC, 2012).

Unfortunately, the adoption rates of the “Programa de Certificación de Edificaciones Sustentables” have been very low mainly because the process to obtain the certification is slow and not very clear (RECONECTA, 2011, OBRASWEB, 2012). Hence, green building practices could be encouraged by simplifying the certification process stages as well as by instituting mandatory commercial building codes similar to Calgreen.

4. Promote the inclusion of mandatory clauses in the current municipal construction codes which ensure the installation of efficient water equipment such as toilets, urinals, faucets, and showers in new construction as well as a program to replace the existing inefficient ones. This type of replacement program has proven successful in the energy sector. For example, where government incentives are used to encourage replacing old inefficient refrigerators with a new efficient ones, as well incandescent lamps for fluorescent ones (SENER, 2011, FIDE, 2011).

8. ACKNOWLEDGEMENTS

The first author acknowledges financial support from the Universidad Michoacana (UMSNH) in Mexico. The first author owes also a debt of appreciation to Odón de Buen for the Mexican building stock data used in this paper.

9. REFERENCES

ADELAAR, M., PASINI, M., BUEN, O. D. & SELKOWITZ, S. 2008. Paper 1: Green Building Energy Sce-

narios for 2030. Montreal: Commission for Environmental Cooperation.

BRECEDA-LAPEYRE, M. 2004. Agua y Energía en la Ciudad de México. Mexico, D.F: Universidad de la Ciudad de México.

CALIFORNIA BUILDING STANDARDS COMMISSION 2010. California Green Building Standards Code: Calgreen. California Code of Regulations. Sacramento, CA.

CFE. 2010. Tarifas para el servicio de bombeo de aguas potables o negras de servicio público. [Online]. Mexico: Comisión Federal de Electricidad. Available: <http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas.asp?Tarifa=6&Anio=2010&mes=10> 2010].

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA 2008a. Estadísticas del Agua en México Edición 2008. Coyoacán, México: Gobierno Federal.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA 2008b. Programa Nacional Hídrico 2007-2012. In: SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (ed.). Coyoacán, México.

DE BUEN, O. 2009. Regional report on greenhouse gas emission reduction potentials from buildings: Mexico. Paris: United Nations Environment Programme

DZIEGIELEWSKI, B., KIEFER, J. C., OPITZ, E. M., PORTER, G. A., LANTZ, G. L., DEOREO, W. B., MAYER, P. W. & NELSON, J. O. 2000. Commercial and Institutional End Uses of Water. Denver, CO: AWWA Research Foundation and American Water Works Association.

FIDE. 2011. Cambio tu viejo refrigerador por uno nuevo [Online]. Mexico: FIDE. Available: <http://www.fide.org.mx/home/home.asp> 2011].

GRAJEDA, E. 2009. Delinean nuevas tarifas para 2010 de agua en el D.F. El Universal, December 22th, 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA 2004. Panorama censal de los organismos operadores de agua en México. Censos Económicos 2004. Aguascalientes, México.

IPCC 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas inventories. . In: EGGLESTON H.S., B. L., MIWA K., NGARA T., AND TANABE K. (EDS). (ed.). Japan: Institute for Global Environmental Strategies.

JAMES, K., GODLOVE, CHRISTOPHER., AND CAMPBELL, STEPHANIE 2003. Watergy, Agua y Energía: Aprovechando las oportunidades de eficiencia de agua y energía aún no exploradas en los sistemas municipales de agua. WATERGY. Washington, DC: Alliance to Save Energy and USAID.

OOAPAS MORELIA. 2010. RE: Entrevista directa en planta potabilizadora de agua “Vista Bella” y “La Mitzita”.

OOAPASP. 2010. RE: Entrevista directa en Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “San Pedrito” y “Las Garzas”.

POGM 2010. Decreto tarifario para los servicios de Organismo Operador Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento Morelia. Morelia, Mexico: Periódico oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo.

ROSAS-FLORES, J. A., ROSAS-FLORES, D. & GÁLVEZ, D. M. 2011. Saturation, energy consumption, CO2 emission and energy efficiency from urban and rural

households appliances in Mexico. Energy and Buildings, 43, 10-18.

ROSAS, J., SHEINBAUM, C. & MORILLON, D. 2010. The structure of household energy consumption and related CO2 emissions by income group in Mexico. Energy for Sustainable Development, 14, 127-133.

SAPDM. 2011. Tarifas para establecimientos comerciales e industriales [Online]. Monterrey, Mexico: Servicios de agua potable y drenaje de Monterrey, I.P.D. Available: http://www.sadm.gob.mx/PortalSadm/Docs/t_TARIFA6.pdf.

SENER. 2011. Programa Luz Sustentable [Online]. Mexico. Available: <http://www.luzsustentable.gob.mx/paginas/home.php> 2011].

SISTEMA METEOROLÓGICO NACIONAL 2009. Productos Climatológicos. México D.F.: Gobierno Federal.

UN WATER & FAO 2007. Coping with water scarcity. Challenge of the twenty-first century. Paris, France.

USGBC. 2012. LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) Program. USA. <http://www.usgbc.org/leed>.

SURSUM VERSUS

