

Tópicos selectos de ingeniería y ciencias ambientales

Tópicos selectos de ingeniería y ciencias ambientales /Roberto Pichardo Ramírez, Juana Treviño Trujillo, Julio César Rolón Aguilar, coordinadores .—Cd. Victoria, Tamaulipas : Universidad Autónoma de Tamaulipas ; Ciudad de México : Editorial Fontamara , 2022.

254 págs. ; 17 x 23 cm.

1. JNM - Enseñanza superior; estudios avanzados

LC: TD1066 T6.7 2022 DEWEY: 607 - Educación. investigación. temas relacionados con la tecnología

Universidad Autónoma de Tamaulipas
Matamoros SN, Zona Centro
Ciudad Victoria, Tamaulipas C.P. 87000
D. R. © 2022

Consejo de Publicaciones UAT
Centro Universitario Victoria
Centro de Gestión del Conocimiento. Tercer Piso
Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. C.P. 87149
Tel. (52) 834 3181-800 • extensión: 2912 • www.uat.edu.mx
consejopublicacionesuat@outlook.com

Libro aprobado por el Consejo de Publicaciones UAT
ISBN UAT: 978-607-8888-10-8

Editorial Fontamara, S.A. de C.V.
Av. Hidalgo No. 47-B, Colonia Del Carmen
Alcaldía de Coyoacán, 04100, CDMX, México
Tels. 555659-7117 y 555659-7978
contacto@fontamara.com.mx • coedicion@fontamara.com.mx • www.fontamara.com.mx
ISBN Fontamara: 978-607-736-790-1

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra incluido el diseño tipográfico y de portada, sea cual fuera el medio, electrónico o mecánico, sin el consentimiento del Consejo de Publicaciones UAT.
Impreso en México • *Printed in Mexico* Libro digital

Este libro fue dictaminado y aprobado por el Consejo de Publicaciones UAT mediante un especialista en la materia perteneciente al Sistema Nacional de Investigadores (SNI). Asimismo, fue autorizado por el Comité interno de selección de obras de Editorial Fontamara mediante el sistema “doble ciego” en la sesión del segundo semestre 2022.

Tópicos selectos de ingeniería y ciencias ambientales

Coordinadores:

Roberto Pichardo Ramírez

Juana Treviño Trujillo

Julio César Rolón Aguilar



C.P. Guillermo Mendoza Cavazos
PRESIDENTE

Dra. Mariana Zerón Félix
VICEPRESIDENTE

Dr. Leonardo Uriel Arellano Méndez
SECRETARIO TÉCNICO

Mtro. Franklin Huerta Castro
VOCAL

Dra. Rosa Issel Acosta González
VOCAL

Mtro. Rafael Pichardo Torres
VOCAL

Mtro. Mauricio Pimentel Torres
VOCAL

Consejo Editorial del Consejo de Publicaciones de la Universidad Autónoma de Tamaulipas

Dra. Lourdes Arizpe Slogher • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Amalio Blanco** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dra. Rosalba Casas Guerrero** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Francisco Díaz Bretones** • Universidad de Granada, España | **Dr. Rolando Díaz Lowing** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Manuel Fernández Ríos** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dr. Manuel Fernández Navarro** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dra. Juana Juárez Romero** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dr. Manuel Marín Sánchez** • Universidad de Sevilla, España | **Dr. Cervando Martínez** • University of Texas at San Antonio, E.U.A. | **Dr. Darío Páez** • Universidad del País Vasco, España | **Dra. María Cristina Puga Espinosa** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Luis Arturo Rivas Tovar** • Instituto Politécnico Nacional, México | **Dr. Aroldo Rodrigues** • University of California at Fresno, E.U.A. | **Dr. José Manuel Valenzuela Arce** • Colegio de la Frontera Norte, México | **Dra. Margarita Velázquez Gutiérrez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. José Manuel Sabucedo Cameselle** • Universidad de Santiago de Compostela, España | **Dr. Alessandro Soares da Silva** • Universidad de São Paulo, Brasil | **Dr. Akexandre Dorna** • Universidad de CAEN, Francia | **Dr. Ismael Vidales Delgado** • Universidad Regiomontana, México | **Dr. José Francisco Zúñiga García** • Universidad de Granada, España | **Dr. Bernardo Jiménez** • Universidad de Guadalajara, México | **Dr. Juan Enrique Marcano Medina** • Universidad de Puerto Rico-Humacao | **Dra. Ursula Oswald** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Arq. Carlos Mario Yori** • Universidad Nacional de Colombia | **Arq. Walter Debenedetti** • Universidad de Patrimonio, Colonia, Uruguay | **Dr. Andrés Piqueras** • Universitat Jaume I, Valencia, España | **Dra. Yolanda Troyano Rodríguez** • Universidad de Sevilla, España | **Dra. María Lucero Guzmán Jiménez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dra. Patricia González Aldea** • Universidad Carlos III de Madrid, España | **Dr. Marcelo Urra** • Revista Latinoamericana de Psicología Social | **Dr. Rubén Ardila** • Universidad Nacional de Colombia | **Dr. Jorge Gissi** • Pontificia Universidad Católica de Chile | **Dr. Julio F. Villegas †** • Universidad Diego Portales, Chile | **Ángel Bonifaz Ezeta †** • Universidad Nacional Autónoma de México

Índice

| | |
|---------------------|---|
| Presentación | 9 |
|---------------------|---|

Sección I

| | |
|--|----|
| Disponibilidad y manejo de recursos hídricos | 11 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1. Estimación de volumen de agua de la laguna del Chairel en Tampico, Tamaulipas, México, utilizando un modelo topobatimétrico 3D <i>María Luisa Berenice Benito Díaz, Susan Margarita Maldonado Robert y Ruth del Carmen Galindo López</i> | 13 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 2. La partición del espectro de energía para obtener parámetros del oleaje en condiciones de tormenta <i>Marco Julio Ulloa Torres, Rocío del Carmen Vargas Castilleja y Julio César Rolón Aguilar</i> | 23 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 3. Eutrofización y florecimientos algales nocivos (FAN). Caso de estudio: laguna del Carpintero, Tampico, Tamaulipas, México <i>Mónica Cristina Rodríguez Palacio, Cruz Lozano Ramírez, Marisol Martínez Hernández y René Bernardo Elías Cabrera Cruz</i> | 43 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 4. Disponibilidad futura del recurso hídrico en la cuenca del río Tamesí <i>Dora María Esther González Turrubiates, Gabriel Arcos Espinosa, Esperanza Martínez Cano y Alfonso Gutiérrez López</i> | 59 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 5. Sonda multiparamétrica para medir la calidad del agua <i>Alfonso Betancourt Nuñez, Alejandro Humberto García Ruíz y Mayra Guadalupe Treviño Berrones</i> | 73 |
|--|----|

Sección II

| | |
|--|-----|
| Análisis de nuevos materiales en la ingeniería | 101 |
|--|-----|

| | |
|---|-----|
| CAPÍTULO 6. Evaluación del pavimento asfáltico recuperado (RAP) como sustituyente del agregado mineral en una carpeta asfáltica nueva mediante algoritmos de redes neuronales artificiales (RNA) <i>Raúl Alejandro Morales Rivera, Juana Treviño Trujillo y Ricardo Tóbas Jaramillo</i> | 103 |
|---|-----|

| | |
|---|-----|
| CAPÍTULO 7. Análisis de las propiedades mecánicas de un concreto con la adición de vidrio reciclado | 113 |
| <i>Rodolfo Barragán Ramírez, Marcos Alfredo Azuara Hernández y Edgar Nicolás Arteaga Campos</i> | |
| CAPÍTULO 8. Estudio y análisis de concreto reciclado, utilizado como agregado grueso en mezcla de concreto hidráulico | 129 |
| <i>Rodolfo Barragán Ramírez, David Moreno Ramos y Pamela Palmas Delgado</i> | |
| CAPÍTULO 9. Análisis del comportamiento de la resistencia a la compresión de un concreto adicionado con ceniza de hueso seco bovino | 167 |
| <i>Marcos Alfredo Azuara Hernández, Rodolfo Garza Flores y Francisco Ángel Olivera Zura</i> | |
| Sección III | |
| Gestión ambiental y cambio climático | 187 |
| CAPÍTULO 10. El estado de la vivienda en Tamaulipas (2000-2020) | 189 |
| <i>Elda Margarita Hernández Rejón, Raúl Treviño Hernández y Aurora Martínez Loaiza</i> | |
| CAPÍTULO 11. La percepción del cambio climático en egresados ingenieros de educación superior en la zona Sur de Tamaulipas | 203 |
| <i>Nora Hilda González Durán, Juan Carlos Guzmán García y Carlos Omar Sosa Del Ángel</i> | |
| CAPÍTULO 12. Bases teóricas y marco de referencia para el sistema de señalamiento marítimo del Puerto Industrial de Altamira, Tamaulipas | 217 |
| <i>Esperanza Martínez Cano, Gabriel Arcos Espinosa, Dora María Esther González Turrubiates y Héctor Manuel Sánchez García</i> | |
| CAPÍTULO 13. El enfoque biocultural en la política climática de la 4T | 237 |
| <i>José Clemente Rueda Abad y Oliver Mendoza Cano</i> | |

Presentación

En el presente libro, se muestran contribuciones de investigadores que colaboran en la actividad de difusión científica de la Facultad de Ingeniería Tampico de la Universidad Autónoma de Tamaulipas en su área de investigación en la ingeniería, e invitados de otras instituciones insertas en el área de ciencias ambientales.

En esta obra se proponen informes y resultados recientes sobre nuevos progresos en las áreas interesantes y prometedoras de investigación en ingeniería y ciencias ambientales. Este documento también incluye elementos teóricos, metodológicos y prácticos para diseño y solución de problemas mediante el análisis detallado de cada problemática atendida.

La Facultad de Ingeniería Tampico de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, se encuentra en el sur del estado, es una región costera y rodeada de cuerpos de agua, lo que propicia el estudio de los investigadores en esta disciplina. En la primera sección del libro se destacan aspectos de disponibilidad y manejo de recursos hídricos: se encuentran trabajos de estimación del volumen de agua en la laguna del Chairel, que es la fuente de abastecimiento de agua potable en la zona conurbada del sur de Tamaulipas; las investigadoras utilizan un modelo topobatimétrico en 3D, para su estimación. En otro capítulo se muestran técnicas para obtener parámetros de oleaje en condiciones de tormenta, también una preocupación latente en la sociedad del sur de Tamaulipas, en el tiempo de huracanes. Desde una perspectiva ambiental, se estudia en otro capítulo lo nocivo que representa la presencia de algas en la laguna del Carpintero en Tampico, siendo esta un atractivo turístico y una representación tradicional para los tampiqueños. Investigadores estudian la disponibilidad futura del recurso hídrico en la cuenca del río Tamesí, que es el que alimenta a los cuerpos de agua de la región. Finalmente, en esta sección se aplica la ingeniería de *software* para medir la calidad del agua a través de una sonda multiparamétrica.

En la segunda sección, se analizan nuevos materiales en la ingeniería. Se aplica ingeniería de *software* para fines de evaluar material reciclado para su reuso. Se muestran resultados de estudios experimentales en muestras de concreto utilizando agregados diversos con diferentes productos, como vidrio y hueso bovino; además también el mismo concreto reciclado usándose como agregado grueso.

Gestión ambiental y cambio climático es la tercera y última sección de esta obra, la cual aborda temas como la situación de la vivienda en Tamaulipas, cómo

se percibe el cambio climático en egresados de ingeniería, sistemas de señalamiento marítimo en el Puerto de Altamira; y el enfoque biocultural en la política climática de la cuarta transformación.

Las instituciones de educación superior visualizan la necesidad de promover el proceso de la investigación, proporcionando un espacio de discusión y análisis de los trabajos que realizan sus investigadores, fomentando el conocimiento entre alumnos y académicos, así también la formación y consolidación de redes con otras instituciones, que permitan una labor investigativa más eficaz y un incremento sustancial en la difusión de los nuevos conocimientos.

Por ello, los temas que comprenden esta obra responden a las demandas de investigación, innovación tecnológica y desarrollo sustentable regional, dando como consecuencia proyectos de investigación que proponen soluciones a estas necesidades y problemáticas sociales y medioambientales, y con esto se pretende divulgar resultados científicos y tecnológicos en beneficio de la población.

Académicamente, los coordinadores de esta obra estamos seguros de que este esfuerzo editorial resultará de utilidad para alumnos, docentes e investigadores, además de que se podrá usar como texto técnico y para complementar la bibliografía de asignaturas de licenciatura y posgrado. Agradecemos todas las aportaciones realizadas y facilidades prestadas para esta edición.

Los coordinadores

Sección I

Disponibilidad y manejo de
recursos hídricos

Estimación de volumen de agua de la laguna del Chairel en Tampico, Tamaulipas, México, utilizando un modelo topobatimétrico 3D

*María Luisa Berenice Benito Díaz¹
Susan Margarita Maldonado Robert²
Ruth del Carmen Galindo López³*

Resumen

El municipio de Tampico se encuentra rodeado por un sistema lagunario que está integrado por una serie de cuerpos de agua de gran importancia para la zona sur de Tamaulipas, y están interconectados de la siguiente manera; laguna del Chairel, laguna del Charro, laguna la Escondida y laguna de Tancol, localizadas en la parte final de la cuenca del río Tamesí, lagunas que en su mayoría son de agua dulce y llegan gracias a la conexión que tienen con el río Tamesí. De estas lagunas mencionadas, el área de estudio se centra en la laguna del Chairel. Su uso principal es la captación para el abastecimiento de agua potable para la distribución de las poblaciones de Tampico y Madero. El 27 de octubre de 1927 se declara que las aguas, cauces y riberas de la laguna del Chairel del estado de Tamaulipas, son propiedad de la nación (DOF, 1927).

En los últimos años en la zona sur de Tamaulipas se han reducido las precipitaciones, lo que ha derivado en niveles críticos en el sistema lagunario, donde se estima que se ha perdido más de un 50% de captación, sin embargo, no hay datos relevantes que corroboren estos indicadores. El presente trabajo muestra la metodología empleada para determinar el volumen de almacenamiento de agua en la laguna del Chairel mediante trabajos topobatimétricos. Con esta información se pueden plantear soluciones a problemas futuros y facilitar la toma de decisiones.

Palabras clave: lagunas, almacenamiento, topobatimétricos.

^{1 2 3} Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller” (FIANS), Universidad Autónoma de Tamaulipas, México.

Introducción

Para que un cuerpo de agua pueda tener una mayor funcionalidad, es necesario monitorearlo constantemente y conocer su comportamiento mediante estudios batimétricos. Un estudio batimétrico muestra el relieve del fondo y la morfología del terreno (Balochi, 2017). Al ser un elemento tan importante para la vida humana, es necesario conocer la disponibilidad y los volúmenes almacenados de agua que se usará en actividades como el riego de cultivos, generación de energía eléctrica y abastecimiento en general.

Imagen 1

Mapa de localización de la laguna del Chairel en Tampico, Tamaulipas



Fuente: elaboración propia a partir de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Conabio, 2015).

La laguna del Chairel, se encuentra entre las coordenadas geográficas de latitud $22^{\circ} 14' 18.30''$ N - $22^{\circ} 15' 30.11''$ y de longitud $97^{\circ} 53' 27.04''$ O - $97^{\circ} 52' 33.21''$ O, dentro del municipio de Tampico, Tamaulipas, que cuenta con 297 562 habitantes (INEGI, Censo de Población y Vivienda 2020, 2022). El área de estudio estimada es de 110 ha. Esta zona pertenece a la región hidrológica N° 26 (río Pánuco) dentro de la cuenca R. Tamesí en la carta INEGI F14B74 escala 1:50 000 (SIATL, 2022) y se encuentra en la zona de baja sismicidad.

Metodología

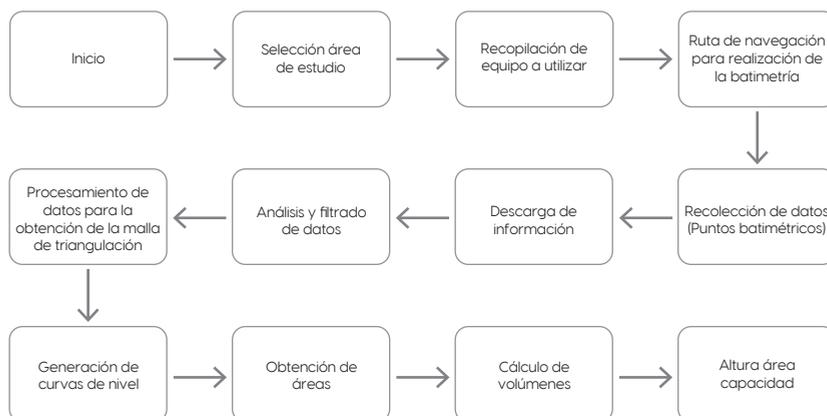
Para poder determinar el volumen de almacenamiento de la laguna del Chairel, es necesario realizar trabajos topográficos y batimétricos para después filtrar y analizar la información recabada en campo. A continuación, se explica brevemente la metodología de campo para esta investigación realizada en un área de 110 hectáreas con seccionamientos cada 10 metros.

Para la recolección de datos batimétricos se utilizó un equipo GPSMAP 188C Sounder, el cual está integrado por; una computadora que permite almacenar las mediciones realizadas en campo; transductor que transforma la energía eléctrica en pulsos, ondas sonoras, que dirige hacia el fondo y registra unidades de profundidad; antena receptora que permite determinar la ubicación geográfica.

Este equipo llamado también ecosonda, se instala en una embarcación que recorre la laguna por medio de una ruta marcada previo a la recolección de datos, ruta de apoyo para el registro de puntos cada 10 metros dentro del cuerpo de agua.

Imagen 2

Metodología a seguir para la estimación de volumen de la laguna del Chairel



Fuente: elaboración propia.

Después de realizar el estudio batimétrico, se procedió a realizar un estudio topográfico, el cual será ligado con la batimetría para poder generar el Modelo Digital de Elevación (DEM), o también llamado modelo topobatimétrico 3D.

Para el levantamiento topográfico se utilizó un equipo RTK South S82T el cual trabaja en tiempo real por medio del Sistema Global de Navegación Satelital (GNSS), este equipo está integrado por una base, un radio, una antena y un rover. La

base queda fija en un banco de nivel más cercano a la zona de estudio, para este caso se ligó con la red Geodésica Nacional Pasiva (INEGI, Mapa Digital de México, 2022); la base a su vez está conectada por un radio y una antena que transmiten la señal del GNSS hacia al *rover* y obtienen las coordenadas del área de estudio en tiempo real.

Imagen 3

Trabajos batimétricos en la laguna del Chairé



Fuente: elaboración propia.

Procesamiento de información

Con la ayuda de diferentes *softwares* (CivilCAD, AutoCAD, ArcGis, Global Mapper) se realiza el procesamiento de datos batimétricos y topográficos. A partir de la nube de puntos recolectados en campo (ver Imagen 4) se genera una malla de triangulación que será clave para determinar áreas, volúmenes, curvas de nivel, isobatas y el Modelo Digital de Elevación (DEM).

Imagen 4

Imagen satelital de los puntos recolectados en campo



Fuente: elaboración propia.

Resultados y análisis

Los resultados de este trabajo de investigación incluyen; isobatas, DEM y gráfica de elevación-área-capacidad. Con los datos de la batimetría se generaron isobatas y el MED que permitieron obtener el área y volumen por cada cota, para poder construir la gráfica de la curva de área-capacidad-elevación del lecho lacustre en donde se representa para cada nivel de la superficie del agua, el aumento de volumen y valores del área en función de su profundidad (ver Gráfica 1).

A continuación, se presentan las isobatas obtenidas sobre la laguna del Chairel, para identificar el nivel de las elevaciones del fondo del embalse, se utilizó la gama de colores. El azul representa las profundidades que van de -6.00 m s.n.m. (metros sobre el nivel del mar) y las isobatas en tonalidades rojas refieren a isobatas con valor de 0.22 m s.n.m., el volumen que se desea obtener corresponde al área encerrada entre las curvas (ver Imagen 5).

Imagen 5

Isobatas del lecho lacustre de la laguna del Chairail



Fuente: elaboración propia

Imagen 6

Modelo digital de elevación de la laguna del Chairail



Fuente: elaboración propia.

El DEM es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud del fondo del lecho lacustre. Con las isobatas se generó el DEM el cual nos permite visualizar el relieve de fondo bajo el espejo de agua y los montículos de los islotes que se forman dentro del embalse (ver Imagen 6).

Tabla 1

Capacidad volumétrica, área acumulada y elevaciones de la laguna del Chairel

| Elevaciones | Área acumulada m ² | Volumen total acumulado | Volumen acumulado en hm ³ |
|-------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| -6 | 0 | 0 | 0 |
| -5.5 | 16334.55 | 4083.64 | 0.0040836 |
| -5 | 26596.08 | 10732.66 | 0.0107327 |
| -4.5 | 31485.42 | 18604.01 | 0.018604 |
| -4 | 35633.24 | 27512.32 | 0.0275123 |
| -3.5 | 40632.31 | 37670.4 | 0.0376704 |
| -3 | 46929.77 | 49402.84 | 0.0494028 |
| -2.5 | 76216.08 | 68456.86 | 0.0684569 |
| -2 | 311045.18 | 146218.16 | 0.1462182 |
| -1.5 | 474077.78 | 197676.52 | 0.1976765 |
| -1 | 1115611.04 | 476579.28 | 0.4765793 |
| -0.5 | 1714788.25 | 905276.35 | 0.9052763 |
| 0 | 2276646.57 | 1450944.09 | 1.4509441 |
| 1 | 2718709.83 | 2810299.01 | 2.810299 |

Fuente: elaboración propia.

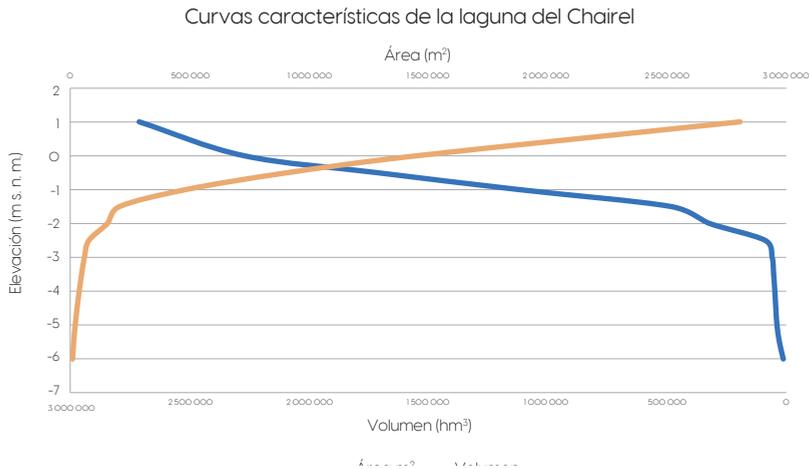
En la Tabla 1 se observan los resultados de las lecturas de elevación obtenidas durante las mediciones batimétricas de la laguna del Chairel, y los valores del área entre curvas de nivel necesarias para la construcción de las curvas área-capacidad del embalse.

La medición para la determinación de la profundidad presenta una diferencia de elevaciones que van desde la cota más baja de -6.68 m s.n.m. hasta -0.22 m s.n.m. El área acumulada es de 2 718 709.83 m² y los volúmenes calculados en hm³ permiten conocer la capacidad de almacenamiento del embalse.

Como resultado de este estudio se obtuvo un volumen de agua de 2.8102990 hm³, que corresponde a la capacidad de almacenamiento del embalse del Chairel.

Gráfica 1

Elevaciones-áreas-capacidades



Fuente: elaboración propia.

La Gráfica 1 muestra la magnitud del espejo de agua de la laguna a diferente elevación para poder estimar el volumen debajo de la superficie del agua. Estas curvas son necesarias para el diseño ya que permiten la ubicación de obras de toma, corona y aliviadero. La curva naranja representa el área de una superficie de agua dentro de una determinada curva de nivel. La curva azul indica el volumen de agua que se encuentra debajo de la superficie del agua.

Conclusiones

Al desconocer los volúmenes de almacenamiento con los que cuenta la laguna del Chairel, se realizó un análisis espacial del lecho lacustre. Los objetivos fueron delimitar el área de estudio, realizar los trabajos topo batimétricos y determinar la capacidad de almacenamiento de la laguna del Chairel.

Se obtuvieron 18200 puntos recolectados dentro de un área de estudio de 110 ha, que dio a conocer el comportamiento del lecho lacustre, conformado con elevaciones que varían desde los -6.68 m s.n.m., hasta los -0.22 m s.n.m. de profundidad. Con estos datos se llegó al conocimiento que el volumen de almacenamiento de la laguna del Chairel es de 2.8102990 hm³ de agua con una escala de 1 m s.n.m.

Referencias

- Conabio. (12 de 03 de 2015). *Portal de geoinformación 2022. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB)*. Obtenido de Clasificación del municipio según tamaño de localidades, 2010: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Conagua. (26 de julio de 2018). *Sistema de Alerta a Tiempo Real*. <http://www.cna.gob.mx/satr/>
- DOF. (13 de octubre de 1927). Diario Oficial de la Federación. Declaración de que las aguas, cauce y riberas de la laguna denominada Chairel, en el Estado de Tamaulipas, son de propiedad nacional, pág. 1. <https://dof.gob.mx/index.php?year=1927&month=10&day=13&print=true&print=true>
- Francisco, C. (2017). Capítulo 7 Estudios Batimétricos en tres embalses del archipiélago cubano, localizados en la región oriental, central y occidental. En C. C. Francisco Balochi, *Procesos de Erosión; Sedimentación en cauces y cuencas* (Vol. 3). [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000253563.locale=enGuevara, M. \(2010\). *Estructuras Hidráulicas Embalses*. Obtenido de Estructuras Hidráulicas Embalses: \[https://www.academia.edu/7223828/Obras_hidraulicas._Embalses\]\(https://www.academia.edu/7223828/Obras_hidraulicas._Embalses\)](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000253563.locale=enGuevara, M. (2010). Estructuras Hidráulicas Embalses. Obtenido de Estructuras Hidráulicas Embalses: https://www.academia.edu/7223828/Obras_hidraulicas._Embalses)
- INEGI. (29 de 4 de 2022). *Censo de Población y Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- _____. (29 de 4 de 2022). *Mapa Digital de México*. <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0O-jLzLjMyMDA4LGxvbjotMTAxLjUwMDAwLHo6MSxsOmMxMTFzZXJ2aWNpb3N8dGMxMTFzZXJ2aWNpb3M=>
- SIATL. (29 de 4 de 2022). *Simulador de Flujo de Agua de Cuencas Hidrográficas*. https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/

La partición del espectro de energía para obtener parámetros del oleaje en condiciones de tormenta

Marco Julio Ulloa Torres¹

Rocío del Carmen Vargas Castilleja²

Julio César Rolón Aguilar³

Resumen

El objetivo de este capítulo es proporcionar una perspectiva de la identificación de los sistemas de olas que se generan simultáneamente durante la propagación de tormentas frente a la costa de Tamaulipas. La técnica de la partición del espectro de energía del oleaje se ejemplifica utilizando espectros obtenidos de mediciones en el campo bajo condiciones de tormenta. Se analiza la respuesta de la superficie del mar a los eventos meteorológicos siguientes: un huracán, una surada, un frente frío y una línea de turbonada. Para cada tormenta analizada, se calculan parámetros del oleaje para las tres primeras particiones. En general, la altura significativa aumenta con el peralte de las olas, y la probabilidad de que las olas rompan se incrementa con el peralte.

Palabras clave: partición del espectro del oleaje, oleaje de tormenta, ingeniería costera, Tamaulipas.

Introducción

La superficie del mar en su estado natural no es estática ni plana, sino llena de irregularidades que rara vez viajan en una sola dirección. Es una mezcla de ondas con diferente longitud, altura y dirección que al sumarse forman un mar desordenado y confuso. La suma de cada una de dichas ondas individuales constituye un mar aleatorio, una representación de su estado en cierto lugar y tiempo dado. El proceso

¹ Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Altamira, México. mulloat@ipn.mx

^{2 3} División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller”, Universidad Autónoma de Tamaulipas, México. rocvargas@docentes.uat.edu.mx, jrolon@docentes.uat.edu.mx

inverso, la descomposición de un mar confuso como la suma de ondas parciales mediante un método llamado análisis de Fourier, se conoce como aproximación espectral. Las olas son ondas generadas por el viento. La energía de las olas es proporcional al cuadrado de la altura, entonces, a mayor altura, las olas tendrán mayor energía, o bien, el estado del mar será más energético. La distribución de la energía de las olas en función de la frecuencia y la dirección se conoce como espectro de energía direccional del oleaje o espectro total. Si la distribución de energía solo se representa en función de la frecuencia de las ondas, se tiene un espectro de energía en frecuencia.

¿Por qué es importante estudiar el espectro de energía del oleaje? A partir del espectro se pueden estimar parámetros del oleaje como la altura significativa, el peralte y la probabilidad que las olas rompan, los cuales son de interés en la ingeniería aplicada. Estos parámetros se utilizan para diseñar y probar en laboratorio *Convertidores de Energía del Oleaje* o CEO (Hann et al., 2015).

Los CEO son dispositivos que capturan y convierten la energía mecánica de las olas en electricidad que, al ser instalados en el mar, tienen que sobrevivir a eventos de tormenta durante todo su ciclo de vida. La combinación de alturas y periodos puede originar cargas intensas en puntos diferentes del casco o carcasa del convertidor (Coe y Neary, 2014). Los convertidores deben resistir el movimiento violento del agua y el golpeteo de las olas de tormenta, dependiendo de la posición de la rotura con respecto al dispositivo y del peralte del oleaje. Una variación mínima en el peralte ocasionará una variación grande en la energía de la ola (Chakraborty, 2020). La rotura de las olas puede producir la aeración de fluido y el atrapamiento de bolsas de aire en los CEO (Ransley et al., 2017), e incluso hundirlos en lapsos cortos de tiempo (Hann et al., 2015). La respuesta de los CEO a dichas olas, es decir, los movimientos extremos de los dispositivos y los cambios en la energía generada, así como la predicción de las cargas extremas sobre las carcasas, los sistemas de toma de fuerza, los amarres y las anclas, son factores importantes que se consideran en el proceso de diseño para minimizar daños estructurales. Fallas en los componentes mecánicos y eléctricos de la cadena de conversión de la potencia en energía, producirán respuestas diferentes del CEO para cada una de las diferentes fallas en el mismo CEO (Chakraborty, 2020).

El movimiento o comportamiento de los barcos mercantes y navales impone riesgos a la habitabilidad y seguridad cuando la navegación en la mar se efectúa en situaciones de oleaje bidireccional o multidireccional (Huang et al., 2021). Estas situaciones se presentan particularmente en tormentas, donde pueden coexistir varios sistemas de olas con alturas, periodos y direcciones diferentes.

Los movimientos peligrosos de los barcos pueden presentarse aun cuando estén anclados. Lo anterior se debe a que las combinaciones diferentes de alturas y periodos pueden formar grupos de olas con distintas características que incrementan los movimientos de rotación del barco anclado, como el balanceo y la arfada (Ma et al., 2011). Adicionalmente, el momento que transfiere el oleaje al impactar y romper sobre estructuras costeras afectan su estabilidad e integridad (Cuomo et al., 2011). Las tormentas pueden producir el desbordamiento del oleaje en puertos y estructuras costeras, pero también valores extremos de la distancia vertical máxima de la ola ascendente producida posterior a la rotura de la ola (Martzikos et al., 2021). Dicha distancia disminuye cuando el peralte de la ola y la altura aumentan (Diwedat, 2016). El control de la erosión en costas y riberas de los ríos, mediante capas de armaduras hechas de unidades rocosas, depende de la altura y la oblicuidad del oleaje, al igual que del periodo y de la longitud de onda, entre otros parámetros (Kurdistani et al., 2019). En consecuencia, la elección adecuada del diámetro promedio de las unidades rocosas requiere de conocimiento de las condiciones locales del oleaje, a fin de que la estructura de control funcione con eficiencia.

La estimación de los parámetros del oleaje en condiciones de tormenta es fundamental en el diseño óptimo de malecones, rompeolas y escolleras, así como en el manejo costero. La identificación de los diferentes sistemas de oleaje que generan las tormentas y la estimación de los parámetros del oleaje para cada sistema ha recibido poca atención en la ingeniería costera. Por ello, el capítulo pretende diseminar la aplicación de la partición del espectro direccional del oleaje para analizar las condiciones del oleaje de tormenta en regiones costeras.

Parámetros espectrales del oleaje

Los parámetros del oleaje calculados con base en mediciones de campo son los siguientes. La altura significativa del oleaje (H_s),

$$H_s \approx 4 \left[\int_0^{2\pi} \int_0^\infty S(f, \theta) df d\theta \right]^{1/2} \quad (1)$$

En la ecuación (1), $S(f, \theta)$ es el espectro total del oleaje en función de la frecuencia, f , y la dirección, θ . El peralte de las olas (S),

$$S = \frac{H_s \kappa_p}{\tanh(\kappa_p h)} \quad (2)$$

En la ecuación (2), κ_p es el número de onda asociado con la frecuencia espectral del oleaje donde la energía es máxima (denominada frecuencia pico, f_p); y h es la profundidad del agua. Los datos de oleaje se midieron frente a la costa de Ciudad Madero y Altamira con equipo acústico fondeado a una profundidad de $h=20$ y 19 m, en intervalos de dos y una hora respectivamente. La probabilidad que una ola rompa, lo cual se denomina fracción de rotura (Q_b), puede aproximarse de acuerdo con la relación $Q_b = 20.6 \bar{S}^{5.48}$, donde \bar{S} es el peralte promedio (Brown et al., 2019). La potencia del oleaje (P),

$$P = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) C_g(f, h) df d\theta \quad (3)$$

En la ecuación (3), ρ es la densidad del agua marina; g es la aceleración debida a la gravedad; y C_g es la velocidad de grupo dada por,

$$C_g(f, h) = \frac{g}{4\pi f} \left[1 + \frac{2\kappa h}{\sinh(2\kappa h)} \right] \tanh(\kappa h) \quad (4)$$

En la ecuación (4), $\kappa = 2\pi / L$ es el número de onda; y L es la longitud de onda.

La partición del espectro de energía

El estado del mar representado por el espectro total está compuesto por uno o más sistemas de olas (Gerling, 1992), cada uno caracterizado por parámetros como la altura significativa (H_s), la frecuencia pico (f_p), la dirección pico (θ_p) y la anchura direccional de la dirección pico (σ_p). El proceso de partición consiste en descomponer el estado del mar en sistemas simultáneos diferentes de olas, donde cada uno de ellos tendrá un nivel de energía diferente. El primer nivel de energía corresponde al oleaje generado por el viento localmente. El segundo nivel de energía corresponde al primer sistema de olas con mayor energía generado fuera del lugar de generación por tormentas lejanas o regionales (Hanson y Mandelberg, 2000). El tercer nivel de energía corresponde al segundo sistema de olas más energético, y así sucesivamente. Por tanto, la partición espectral del oleaje permite caracterizar los niveles de energía de los diferentes sistemas de olas presentes en el espectro de energía total en un tiempo dado.

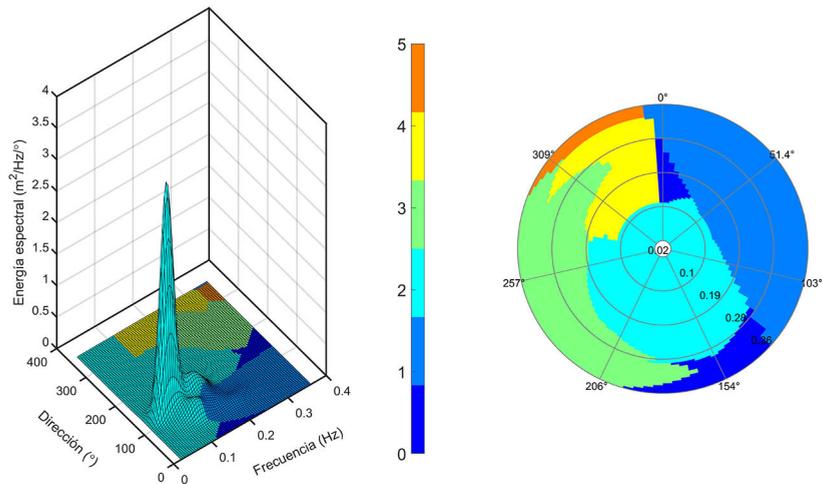
La técnica de partición del oleaje que se utilizó la desarrollaron Hanson y Phillips (2001), en tanto que la ingeniería de *software* libre pertenece a Douglas y Voulgaris (2019). Para un espectro total dado, el *software* determina el número de particiones y obtiene H_s , f_p , θ_p , σ_p y $S(f_p, \theta_p)$ para cada partición.

En la Figura 1 se muestra un ejemplo de la partición de un espectro direccional del oleaje formado por cinco sistemas simultáneos de olas. Cada sistema

o partición se identifica por la escala de color vertical de la gráfica en coordenadas polares. Los valores de las particiones indican lo siguiente: 0, es ruido; 1, es oleaje generado por el viento; $y > 1$, es el oleaje distante más energético en orden descendente de energía. El ruido se refiere a particiones con niveles muy bajos de energía que no fueron resueltas adecuadamente o que no se pudo determinar si conllevan ruido del equipo de medición de oleaje (Hanson y Phillips, 2001). El ruido es inherente en los equipos de medición, al igual que en el procesamiento de los datos de oleaje y en la estimación del espectro total, pues las frecuencias y las direcciones no son continuas. Otra fuente de ruido se relaciona con el nivel de energía mínimo del régimen local del oleaje. La gráfica en tres dimensiones ilustra los niveles de energía de cada partición (Figura 1). El oleaje con mayor energía corresponde a la partición número 2.

Figura 1

Espectro de energía direccional tridimensional particionado (izquierda). Distribución de las particiones obtenidas en coordenadas polares (derecha)



Fuente: elaboración propia.

Después de la obtención de los parámetros espectrales pico para cada partición, se integra el espectro total en la dirección dominante de cada partición tomando en cuenta la anchura direccional. Esto es equivalente a considerar un estado del mar donde se propagan trenes de olas con frecuencias similares alineadas en la dirección del oleaje dominante, cuya superposición formará grupos de olas. Por consiguiente, los parámetros espectrales que resultan de la integración permiten

estudiar grupos de olas con baja anchura direccional. La ola con mayor peralte dentro del grupo puede resultar inestable en la dirección del oleaje dominante, incrementar en amplitud y disipar su energía por rotura.

Oleaje de tormenta

El término tormenta se utiliza en un sentido amplio, para describir el estado del mar perturbado por forzamientos meteorológicos, específicamente, ciclones tropicales, frentes fríos, suradas, líneas de turbonada y vaguada. Estos eventos impactan de manera recurrente la zona conurbada del sur de Tamaulipas (Ulloa y Vargas-Castilleja, 2022).

Los datos que se emplean para describir las tormentas son predicciones meteorológicas de acceso libre elaboradas por el *European Centre of Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis* (ECMWF). El banco de datos se conoce como ERA5 por ser la quinta generación del re-análisis atmosférico del ECMWF para el tiempo y clima global.

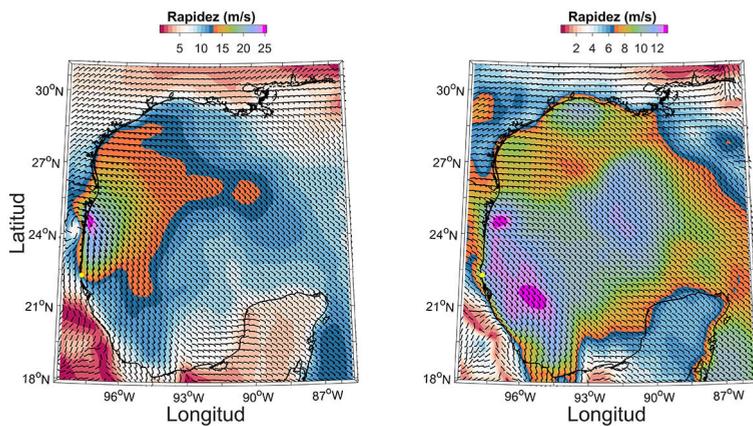
Ciclón tropical Alex (2010)

El oleaje asociado con el paso del huracán Alex de categoría 2 se registró frente a la costa de Ciudad Madero a finales de junio de 2010 (Hernández-Goitortua et al., 2010). La Figura 2 muestra el campo de velocidad del viento en relación con la posición del equipo de medición ubicado en Playa Miramar en el municipio de Madero. El ojo del huracán tocó tierra el 1 de julio de 2010 a las 02:00 UTC cerca de Soto la Marina, Tamaulipas. Los vientos máximos asociados a Alex fueron del orden de 90 km/h. El mismo día, pero a las 17:00 UTC, se presentó viento con componente del sur (surada) con velocidad máxima de unos 50 km/h aproximadamente (Figura 2).

La respuesta de la superficie del mar en función de la potencia del oleaje se muestra en la Figura 3. Sobresale la disminución de la potencia de 29.5 kW/m a 2.7 kW/m el 1 de julio a las 05:02 UTC, que coincide con el debilitamiento de Alex conforme el ojo atravesó la línea de costa hacia tierra firme. El segundo máximo de la potencia, de 31.4 kW/m el 1 de julio a las 17:02 UTC, parece corresponder a oleaje generado por un evento de surada, según se observa en la Figura 2. La serie de tiempo de la Figura 3 da a entender que ocurrieron dos eventos meteorológicos distintos en unos cuantos días. El huracán y la surada se analizaron como si fueran un solo evento de tormenta.

Figura 2

Barbas del viento del 1 de julio de 2010 a las 05:00 UTC (izquierda). Barbas del viento del 1 de julio de 2010 a las 17:00 UTC (derecha)

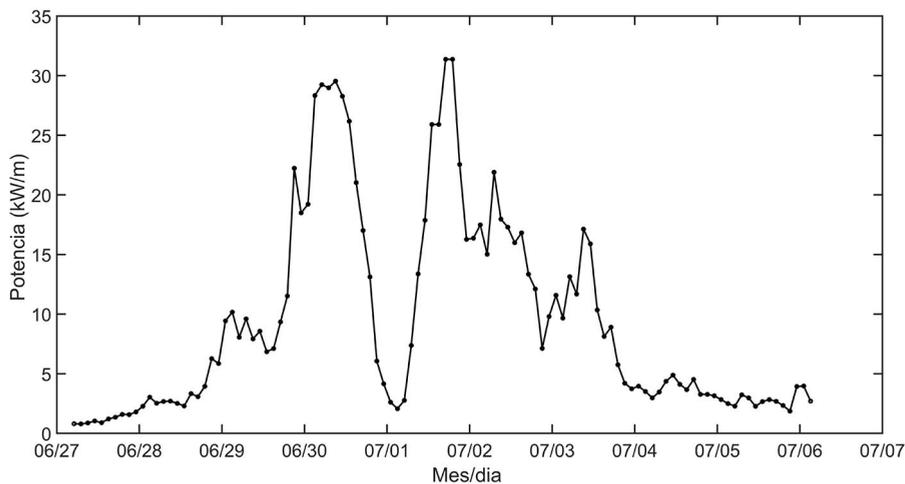


Fuente: elaboración propia.

Nota: El punto en color amarillo indica la posición del equipo de medición. Cada gráfica cuenta con una escala de rapidez diferente.

Figura 3

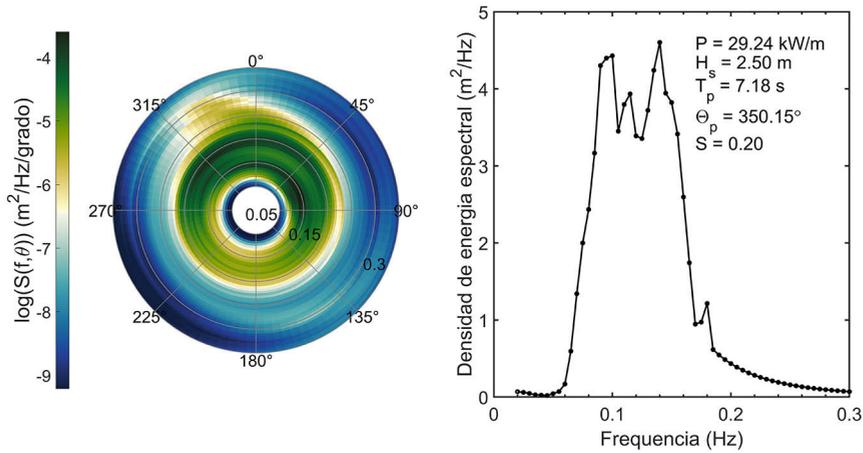
Potencia del oleaje para el evento de tormenta de junio-julio de 2010



Fuente: elaboración propia.

Figura 4

Espectro total del oleaje (izquierda). Espectro en frecuencia del oleaje (derecha)

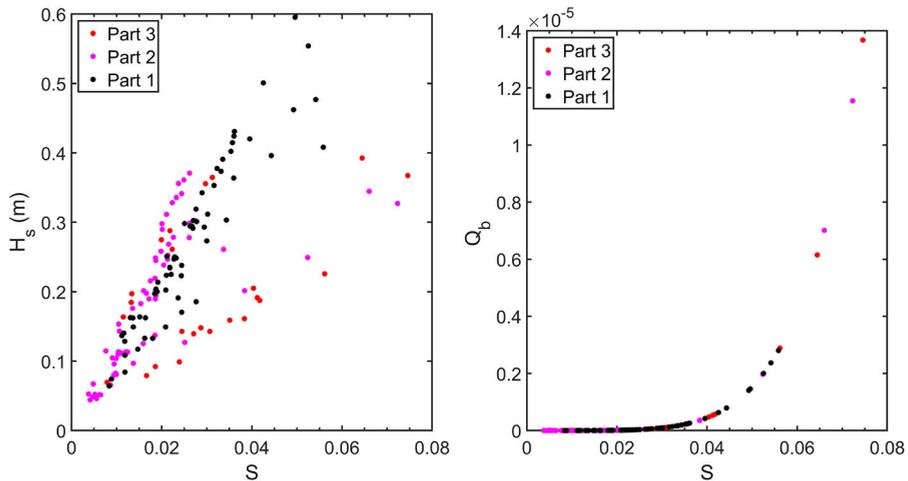


Fuente: elaboración propia.

Nota: Ambas gráficas corresponden al 30 de junio de 2010 a las 05:02 UTC.

Figura 5

La altura significativa en función del peralte (izquierda). La fracción de rotura en función del peralte (derecha)



Fuente: elaboración propia.

Nota: Los colores identifican las tres particiones estudiadas.

La Figura 4 muestra el espectro direccional del oleaje en escala logarítmica y el espectro de energía en frecuencias correspondientes a la potencia máxima debida al huracán Alex (30 de junio a las 05:02 UTC). La mayor energía se encuentra en las bajas frecuencias, entre 0.10 y 0.15 Hz (periodos de 10 a 6.67 s), pero distribuida en una amplia gama de direcciones. La altura significativa fue de 2.5 m y la dirección espectral pico de 350° aproximadamente. Los valores de la altura y la dirección se relacionan con la superposición de todas las frecuencias y direcciones presentes en el estado del mar de las 05:02 UTC del 30 de junio. La técnica de la partición del espectro se aplicó a cada espectro direccional obtenido conforme a la propagación de la tormenta. La correlación entre varios parámetros espectrales para las tres primeras particiones se presenta en la Figura 5.

El peralte se incrementó al aumentar la altura significativa. A mayor peralte, mayor probabilidad de que la ola rompa. El peralte promedio para cada partición, en orden respectivo, fue 0.027, 0.018 y 0.032. En general, se considera que el peralte del oleaje con peralte bajo varía de 0.001 a 0.005, y el correspondiente con peralte medio de 0.005 a 0.009. Las olas con peralte alto presentan un peralte mayor de 0.01. El oleaje con peralte del orden de 0.04 se considera oleaje de tormenta empinada (Kim, 2010). Entonces, los eventos de tormenta generaron olas con peralte alto y baja altura significativa. El esfuerzo del viento produjo que el peralte aumentara más rápido en la primera partición que en la tercera (oleaje menos energético).

De acuerdo con Chawla y Kirby (2002), el inicio de la rotura de la ola ocurre cuando $S \sim 0.7 - 0.8$. Entonces, es poco probable que las olas individuales dentro de los grupos de olas generadas por Alex y la surada se hayan roto. El agrupamiento del oleaje impulsado por los dos eventos de tormenta en la dirección del oleaje dominante coexistió, pero fueron débiles en Playa Miramar. Lo anterior se refleja en la potencia del oleaje máxima obtenida, prácticamente el mismo valor para el huracán y la surada. En Playa Miramar incidió oleaje impulsado por regímenes de forzamiento de viento relativamente cercanos y diferentes. El oleaje asociado al huracán Alex fue de baja energía porque se generó en el cuadrante izquierdo de la trayectoria del huracán. El consenso es que el oleaje de mayor energía se produce en el cuadrante derecho de la trayectoria de la tormenta.

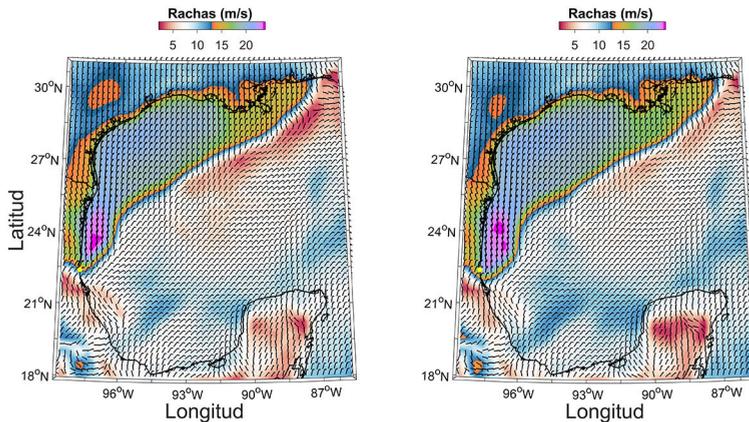
Frente frío (enero 2018)

La temporada de frentes fríos inicia en septiembre y termina en mayo del año siguiente. El Sistema Meteorológico Nacional, con base en la estadística de 1981 a 2010, ha establecido que en promedio se presentan 44 sistemas frontales atmosféricos en el país. Sin embargo, pueden ocurrir frentes fríos fuera de temporada, en los

meses de junio a agosto. Además, no todos los sistemas frontales ingresan al Golfo de México, algunos de ellos se disipan en tierra firme, principalmente hacia el final de temporada.

Figura 6

Barbas del viento del 16 de enero de 2018 a las 22:00 UTC (izquierda). Barbas del viento del 16 de enero de 2018 a las 23:00 UTC (derecha)



Fuente: elaboración propia.

Nota: El punto en color amarillo indica la posición del equipo de medición.

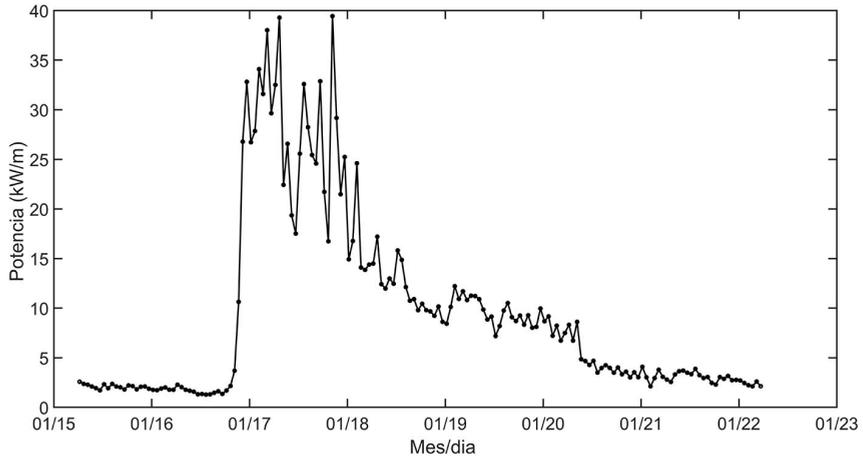
El sistema frontal atmosférico número 23 ingresó a territorio nacional por el norte de Chihuahua, entre las 21:00 UTC del 15 de enero de 2018 y las 00:00 UTC del 16 de enero de 2018. El frente ingresó al Golfo de México por el sur de Texas, entre las 06:00 UTC del 16 de enero y las 09:00 UTC del mismo día. A las 21:00 UTC del 16 de enero, el frente se ubicó al sur de la laguna Madre y de ahí se desplazó rápidamente, alcanzando el sur de la laguna de Tamiahua a las 00:00 UTC el 17 de enero. Las rachas de viento asociadas al frente a las 22:00 y 23:00 UTC del 16 de enero, en relación con el equipo de medición de oleaje instalado frente a la costa de Altamira, se muestran en la Figura 6. Las rachas máximas fueron de 24 m/s (86 km/h), similares a los vientos máximos reportados para el huracán Alex.

La Figura 7 muestra la potencia del oleaje asociada con el paso del frente frío 23. La potencia máxima obtenida (39.4 kW/m a las 20:19:12 UTC del 17 de enero de 2018), fue ligeramente mayor a las correspondientes para el huracán y la surada. En el sitio de medición, los efectos del oleaje asociados al frente frío 23 iniciaron a las 17:19:12 UTC del 16 de enero donde la potencia del oleaje se incrementó de 1.3

kW/m a 32.8 kW/m en tan solo seis horas, indicando condiciones aceleradas del esfuerzo del viento.

Figura 7

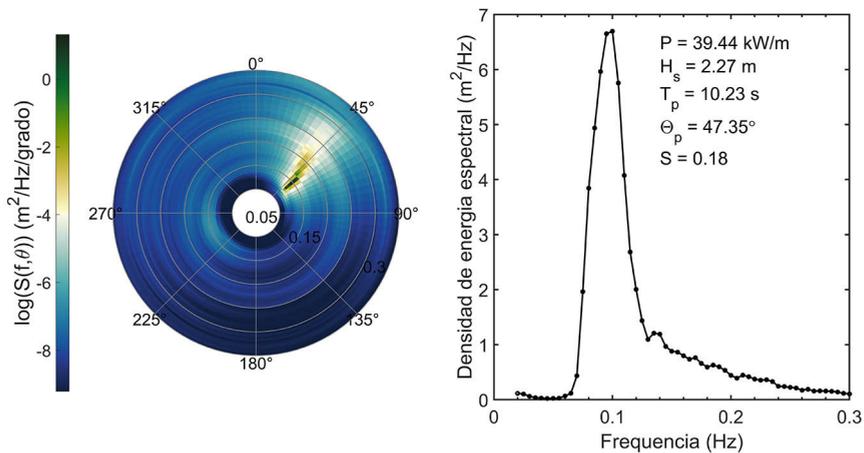
Potencia del oleaje para el frente frío de enero de 2018



Fuente: elaboración propia.

Figura 8

Espectro total del oleaje (izquierda). Espectro en frecuencia del oleaje (derecha). Ambas gráficas corresponden al 16 de enero de 2018 a las 23:19:12 UTC

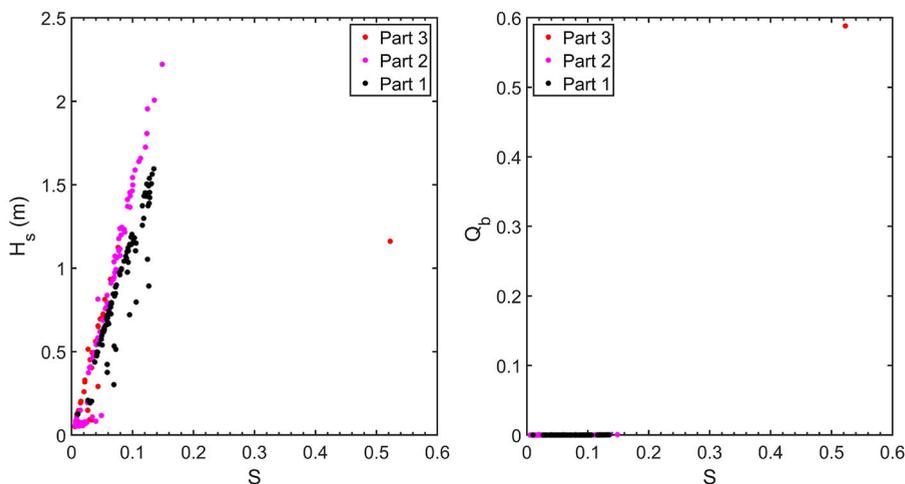


Fuente: elaboración propia.

Los frentes fríos son eventos de alta energía y corta duración. Con respecto a la máxima potencia obtenida, el espectro de energía en frecuencia fue angosto o de banda angosta, con oleaje dominante aproximadamente del noreste (Figura 8). La región de mayor energía se localizó en la banda de frecuencia de 0.075 a 0.120 Hz, equivalente a periodos entre 13.3 y 8.3 s. En comparación con el huracán Alex y el evento de surada (Figura 4), la mayor energía proviene de un intervalo pequeño de direcciones. Los espectros direccionales asociados con el frente frío obtenidos con un intervalo de una hora, también fueron particionados. Los parámetros espectrales para las tres primeras particiones se encuentran en la Figura 9.

Figura 9

La altura significativa en función del peralte (izquierda). La fracción de rotura en función del peralte (derecha)



Fuente: elaboración propia.

Nota: Los colores identifican las tres particiones estudiadas.

El peralte de las olas para las tres particiones aumentó al igual que la altura significativa. La fracción de rotura fue menor de 0.01, con excepción de la tercera partición donde un punto mostró la mayor fracción de rotura y peralte, con valores de $Q_b = 0.52$ y $S = 0.59$ respectivamente. El valor de la altura de dicha ola, con buena probabilidad que haya roto, fue $H_s = 1.16$ m. En general, sólo el oleaje generado por el viento y el correspondiente a la primera partición presentaron peraltes mayores de 0.1. Los peraltes promedio para cada partición fueron 0.079, 0.052 y 0.038, respectivamente.

La detección del oleaje inusual que puede generarse en condiciones de tormenta es una de las principales utilidades de la partición del espectro de energía. Los parámetros del oleaje obtenidos de la partición se pueden utilizar para investigar la respuesta de prototipos de CEO a la acción de olas de tormenta mediante simulaciones numéricas o experimentos de laboratorio. Los peraltes típicos de las olas individuales de los grupos que se logran reproducir en laboratorio para representar condiciones de tormenta varían de 0.167 a 0.264 (Hann et al., 2015).

Frente a la costa de Tamaulipas, cualquier dispositivo instalado en campo estará bajo la acción de oleaje multidireccional (huracanes) y unidireccional (suradas, frentes fríos). Los dispositivos y las cargas en los amarres y anclajes que los sujetan deben estar diseñados para resistir esas condiciones. Un ejemplo de dispositivos bien diseñados son las boyas de recalada que se emplean como puntos de referencia a los barcos que acceden a los puertos como mejor lugar de paso en aguas navegables. El ciclo de vida de estas boyas es amplio, coadyuvan a garantizar condiciones seguras de navegación en litorales, puertos y vías navegables.

Línea de turbonada (mayo 2020)

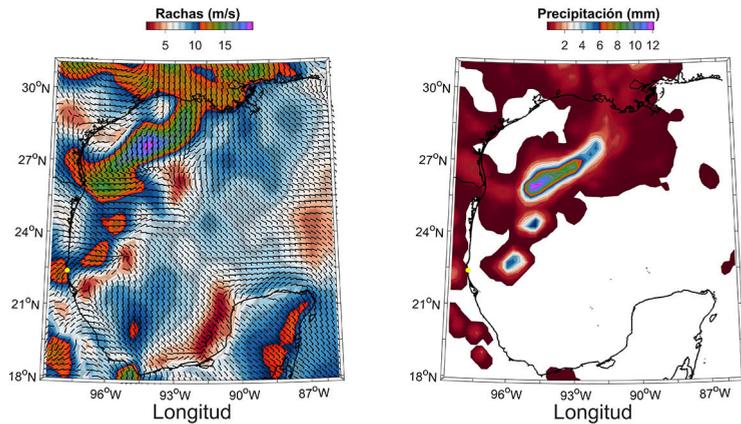
Las líneas de turbonada son sistemas convectivos de meso-escala orientados linealmente, bandas angostas de tormentas activas caracterizadas por un aumento súbito en la magnitud del esfuerzo del viento. Las turbonadas pueden estar asociadas a lluvia, granizadas, tornados o nevadas. Son difíciles de predecir. Los reportes anuales del clima que publica el Sistema Meteorológico Nacional no siguen los eventos de turbonada ni de surada, únicamente los ciclones tropicales y los sistemas frontales atmosféricos. Las turbonadas son particularmente peligrosas para las embarcaciones menores. Los pescadores de palangre (linieros) han vivido situaciones de riesgo por el incremento intempestivo en la rapidez del viento acompañado de oleaje de alta frecuencia y relativa alta amplitud (Ulloa y Vargas-Castilleja, 2022). En esas situaciones, las embarcaciones menores (pangas) y medianas (remolcadores) regresan con celeridad a puerto seguro. La alta frecuencia de las olas y la rapidez de las pangas provoca que las tripulaciones arriben a puerto totalmente empapados y con agua introducida en ellas.

Un ejemplo de las rachas de viento y la precipitación asociada con una línea de turbonada se ilustra en la Figura 10. La línea de turbonada ingresó al Golfo de México desde el Sur de Texas el día 16 de mayo de 2020 entre las 06:00 UTC y las 09:00 UTC, disipándose en el interior del Golfo entre las 18:00 UTC y las 21:00 UTC del mismo día. Se estima que la duración de la turbonada fue de unas 12 horas. La turbonada generó rachas máximas de viento de 20 m/s (72 km/h) a las 20:00 UTC, núcleos de alta precipitación, así como núcleos de rachas de viento intensas y

mínimas (Figura 10). En la costa de Tamaulipas la precipitación fue llovizna ligera, pero las rachas de viento en la región sur fueron de unos 12 m/s (43 km/h).

Figura 10

Barbas del viento del 16 de mayo de 2020 a las 20:00 UTC (izquierda). Precipitación pluvial del 16 de mayo de 2020 a las 20:00 UTC (derecha)

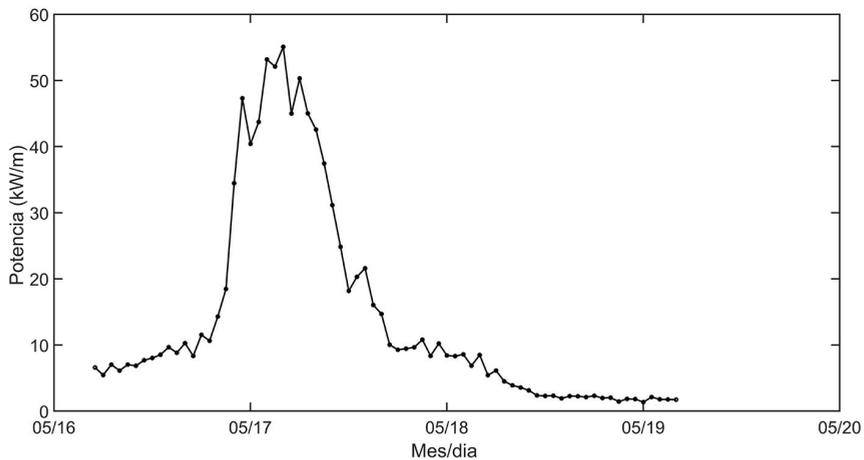


Fuente: elaboración propia.

Nota: El punto en color amarillo indica la posición del equipo de medición.

Figura 11

Potencia del oleaje para la línea de turbonada de mayo de 2020



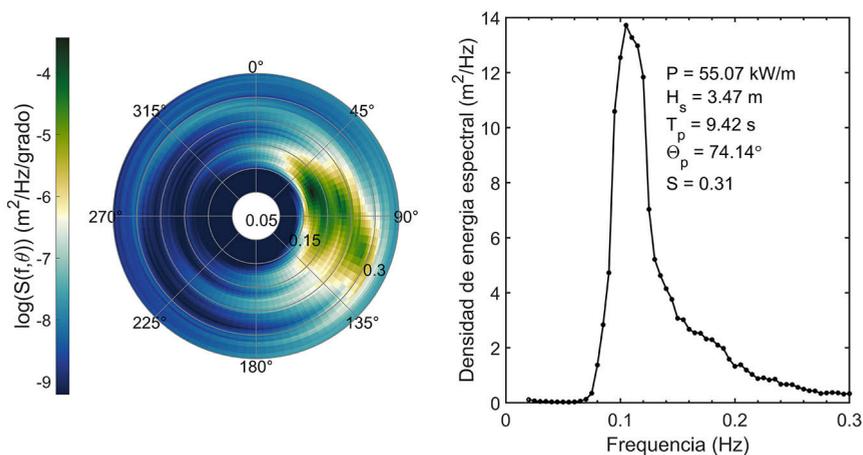
Fuente: elaboración propia.

En el sitio de medición en Altamira, la potencia del oleaje cambió abruptamente de 10.6 kW/m el 16 de mayo de 2020 a las 18:01:02 UTC, a 47.3 kW/m a las 23:01:02 UTC del mismo día (Figura 11). Un incremento de casi 37 kW/m en cinco horas. La potencia máxima generada fue de 57.1 kW/m a las 04:01:02 UTC del 17 de mayo de 2020, siendo un valor mayor a las potencias máximas obtenidas para los eventos de tormenta descritos anteriormente (huracán Alex, surada y frente frío). Al finalizar el día, la potencia disminuyó a 10.2 kW/m.

El espectro de energía en frecuencia para la potencia máxima que se obtuvo fue un espectro angosto (Figura 12), típico de una estructura grupal de olas bien definida. Las olas están formadas por la superposición de ondas con frecuencias ligeramente diferentes que, al estar lentamente fuera de fase unas de otras, forman una onda armónica modulada (Holthuijsen, 2007). En el mar, las ondas armónicas moduladas se observan como un campo de olas muy regular, crestas y valles bien definidos. La mayor energía estuvo en el intervalo de frecuencias 0.090 – 0.135 Hz (11.1 – 7.4 s). Las direcciones con mayor energía presentaron una distribución más amplia que en el caso del frente frío número 23, aproximadamente entre 45° y 120°.

Figura 12

Espectro total del oleaje (izquierda). Espectro en frecuencia del oleaje (derecha). Ambas gráficas corresponden al 17 de mayo de 2020 a las 04:01:02 UTC



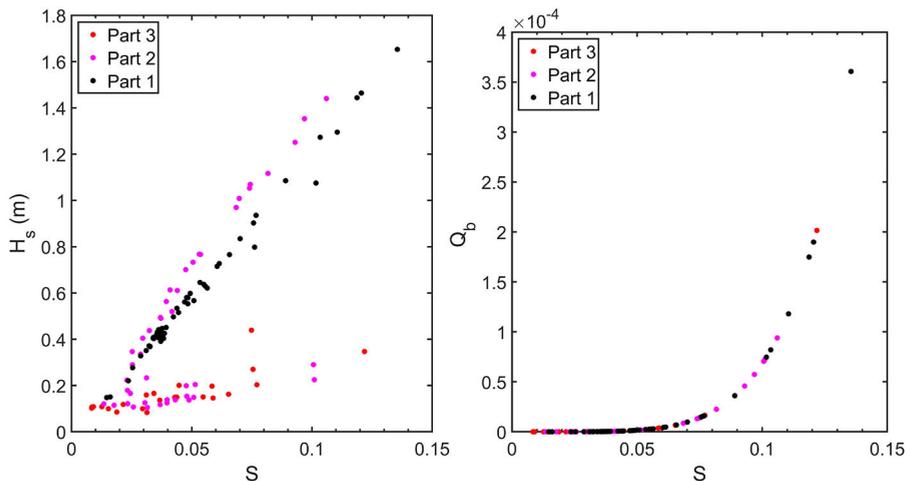
Fuente: elaboración propia.

La partición del oleaje de los espectros direccionales permitió estimar H_s y S a lo largo de $\theta_p \pm \sigma_p$. Del mismo modo que para Alex y la surada, la partición donde H_s alcanzó un valor máximo correspondió al oleaje generado por el viento (Figura 13). Se observa una tendencia positiva de incremento del peralte con el aumento de la altura significativa. La fracción de rotura también aumentó al incrementarse el peralte. Los peraltes mayores de 0.10 estuvieron asociados con alturas significantes que variaron entre 0.2 y 1.6 m.

Los CEO están por lo general diseñados para operar en latitudes altas, en regiones de alta energía del oleaje. El desempeño de los dispositivos mejora entre mayor sea el peralte de las olas. El consenso es que el peralte promedio para el funcionamiento eficiente de los dispositivos actuales debe ser 0.15 o mayor. Un dispositivo adaptado para operar en las condiciones del Golfo de México podría operar bajo condiciones de tormenta, sin embargo, son muchos factores por tomar en cuenta. En orden respectivo, las pendientes promedio para cada partición fueron 0.051, 0.048 y 0.042. El lector interesado calculará la fracción de rotura.

Figura 13

La altura significativa en función del peralte (izquierda). La fracción de rotura en función del peralte (derecha)



Fuente: elaboración propia.

Nota: Los colores identifican las tres particiones estudiadas.

Conclusiones

La partición del espectro de energía del oleaje posibilita identificar sistemas de olas diferentes que ocurren simultáneamente en un tiempo y lugar dados. Los sistemas pueden afectar infraestructura costera y marítima con impactos diferenciados distintos, en función de cuál sea el sistema dominante. El diseño de equipo e infraestructura rara vez toma en cuenta la interacción con sistemas de olas simultáneos, lo cual podría alargar su ciclo de vida minimizando daños estructurales en condiciones extremas del oleaje. Además, se requiere planificar sistemas de alerta de navegación con predicciones que consideren la partición del espectro del oleaje. La razón es que la navegación de embarcaciones mayores y menores, al igual que realizar actividades para turismo de sol y playa bajo esas condiciones, es sumamente peligroso.

La partición del espectro también permite estudiar grupos de olas en la dirección del oleaje dominante que podrían ser inestables y generar súbitamente oleaje de gran peralte y amplitud. El agrupamiento del oleaje es fundamental para entender y modelar los impactos y respuestas de las interacciones de los eventos de tormenta con dispositivos convertidores de la energía del oleaje. Los efectos no lineales afectan la amplitud de crestas y valles, así como el ascenso y descenso de todo el grupo de olas. En consecuencia, la modelación y simulación en laboratorio del oleaje de tormenta debe considerar la partición del espectro de las observaciones de grupos de olas obtenidas en condiciones de tormenta.

México requiere de la formación de recursos humanos calificados en los temas emergentes de la energía marina, capaces de hacer frente a las necesidades de desarrollo productivo y social del país a nivel técnico, científico y ejecutivo. Plantas desalinizadoras de agua y el suministro de electricidad a comunidades aisladas y marginadas socialmente a través de la cosecha de la energía del oleaje, son temas de investigación futuros que coadyuvarán a disminuir la dependencia de los combustibles fósiles.

Referencias

- Brown, A., Thomson, J., Ellenson, A., Rollano, F., Özkan-Haller, H., y Haller, M. (2019). Kinematics and statistics of breaking waves observed using SWIFT Buoys. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 44, 1011-1023. <https://doi.org/10.1109/JOE.2018.2868335>
- Chakraborty, T. (2020). Impact of extreme waves on conversion efficiency of wave energy converter. *Energy, Science & Engineering*, 8, 3441-3456. <https://doi.org/10.1002/esc3.336>
- Chawla, A., y Kirby, J. (2002). Monochromatic and random wave breaking at blocking points. *Journal of Geophysical Research*, 107, 3067. <https://doi.org/0148-0227/02/2001JC001042>

- Coe, R., y Neary, V. (2014). *Review of methods for modeling wave energy converter survival in extreme sea states*. Proceedings of the 2nd Marine Energy Technology Symposium, (April), 15-17.
- Cuomo, G., Piscopia, R., y Allsop, W. (2011). Evaluation of wave impact loads on caisson breakwaters based on joint probability of impact maxima and rise times. *Coastal Engineering*, 58, 9-27. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.08.003>.
- Douglas, C., y Voulgaris, G. (2019). *WavePART v1.1: MATLAB® software for the partition of directional ocean wave spectra*. <http://zenodo.org/record/3495817#.Yi7eeHrMK70>
- Diwedat, A. (2016). Investigating the effect of wave parameters on wave runup. *Alexandria Engineering Journal*, 55, 627-633. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.12.012>
- Gerling, T. (1992). Partitioning sequences and arrays of directional ocean wave spectra into component wave systems. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 9, 444- 458.
- Hann, M., Greaves, D., y Raby, A. (2015). Snatch loading of a single taut moored floating wave energy converter due to focused wave groups. *Ocean Engineering*, 96, 258-271. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.11.011>
- Hanson, J., y Phillips, O. (2001). Automated analysis of ocean surface directional wave spectra. *Journal of Physical Oceanography*, 18, 278-293.
- Hanson, J., y Mandelberg, M. (2000). *Ocean surface waves: automated analysis of directional spectra*. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition, Conference Proceedings, (September), 11-14. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2000.882194>
- Hernández-Goitortua, R., Ulloa, M., y Ortega-Izaguirre, R. (2020). *Características del Huracán Alex durante su trayecto hacia los estados de Tamaulipas y Nuevo León*. In: *La Investigación Científica y Tecnológica Impulsando la Creatividad para Innovar* (Cap. 20, pp. 180-189). Academia Mexicana Multidisciplinaria, A. C. ISBN: 978-607-95209-9-1.
- Holthuijsen, H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CB09780511618536>
- Huang, S., Jiao, J., y Chen, C. (2021). CFD prediction of ship seakeeping behavior in bi-directional cross wave compared with in uni-directional regular wave. *Applied Ocean Research*, 107, 102426. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102426>
- Kim, Y. (2010). *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. World Scientific. <https://doi.org/10.1142/6914>
- Kurdistan, S., Tomasicchio, G., D'Alessandro, F., y Hassanabadi, L. (2019). River bank protection from ship-induced waves and river flow. *Water Science and Engineering*, 12, 129-135. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.05.002>
- Ma, X., Sun, Z., Zhang, Z., Yang, G., y Zhou, F. (2011). The effect of wave groupness on a moored ship studied by numerical simulations. *Journal of Hydrodynamics*, Series B, 23, 145-153. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(10\)60098-4](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(10)60098-4)

- Martzikos, N., Prinos, P., Memos, C. y Tsoukala, V. (2021). Key research issues of coastal storm analysis. *Ocean and Coastal Management*, 199, 105389. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105389>
- Ransley, E., Greaves, D., Raby, A., Simmonds, D., y Hann, M. (2017). Survivability of wave energy converters using CFD. *Renewable Energy*, 109, 235-247. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.003>
- Ulloa, M., & Vargas-Castilleja, R. (2022). Turbonadas, vaguadas y frentes fríos impactan la zona conurbada del sur de Tamaulipas. *Agua & Ambiente*, 8, 22-27.

Eutrofización y florecimientos algales nocivos (FAN). Caso de estudio: laguna del Carpintero, Tampico, Tamaulipas, México

Mónica Cristina Rodríguez Palacio¹

Cruz Lozano Ramírez²

Marisol Martínez Hernández³

René Bernardo Elías Cabrera Cruz⁴

Resumen

Los cuerpos de agua urbanos han sido modificados por el uso y abuso antropogénico. El vertimiento de aguas residuales de origen doméstico, industrial o agrícola ha generado una acumulación de nutrientes en estos cuerpos de agua que han terminado por sufrir un proceso de eutrofización muy severo. Esto permite la proliferación de una gran diversidad de organismos fotosintéticos, muchos de ellos capaces de producir varios tipos de toxinas generadoras de daños a la salud animal y humana. Entre sus principales productores están algunos grupos de dinoflagelados y diatomeas, pero en aguas dulces los más importantes son las cianobacterias. Estas toxinas generan daños en el sistema nervioso, riñones e hígado, principalmente. En este trabajo se hace un comparativo histórico con investigaciones efectuadas en la laguna del Carpintero, Tamaulipas, México y se presentan resultados de un *floreCIMIENTO algal nocivo* (FAN) que se prolongó por varios meses en la laguna. Se hacen recomendaciones básicas a la comunidad y al estado para monitorear la aparición de cianobacterias tóxicas y en su caso tomar acciones para mitigar el proceso.

Palabras claves: florecimientos algales, laguna del Carpintero, eutrofización.

^{1 2 3} Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Departamento de Hidrobiología. Laboratorio de Ficología Aplicada. Av. San Rafael Atlixco 186. Colonia Vicentina. C.P. 09340. Ciudad de México. email: mony@xanum.uam.mx

⁴ Universidad Autónoma de Tamaulipas. Facultad de Ingeniería "Arturo Narro Siller". División de Estudios de Postgrado e Investigación. Programa de Doctorado en Medio Ambiente

Introducción

En las últimas décadas, en muchos de los lagos y reservorios acuáticos, observamos cambios relacionados con el aspecto y la calidad del agua; estos cambios están asociados principalmente a la presencia de altas concentraciones de nutrientes, como el fósforo y el nitrógeno, además de alteraciones en el pH, la salinidad y el oxígeno disuelto entre otros parámetros fisicoquímicos del agua.

El término eutrofización, describe una condición de estos ambientes acuáticos en donde la acumulación de nutrientes ocasiona el crecimiento en exceso de las plantas, algas, microalgas y/o cianobacterias y aunque una cierta productividad de los organismos citados es necesaria para sostener la cadena alimenticia en un ecosistema acuático, el crecimiento en exceso bajo condiciones eutróficas puede llevar a un deterioro del cuerpo de agua y del ecosistema en general. La eutrofización se considera un fenómeno natural, pero en las últimas décadas se ha incrementado en los cuerpos de agua urbanos debido al aumento en el aporte de aguas residuales que provienen de la urbanización, agricultura, minería y desechos de la industria alimenticia, química y farmacéutica, a esto se le conoce como eutrofización antrópica (Carlson, 1977; Karydis et al., 1983).

Este proceso conlleva a la formación de *florecimientos algales nocivos* (FAN), que se refiere a un crecimiento desmesurado de especies fotosintéticas y estas pueden ser o no tóxicas, ya que van ligadas a la producción de metabolitos secundarios que ocasionan alto impacto al medio ambiente, así como a la salud humana y animal (Park y Watanabe, 1996; Cood, 1998; Christoffersen, 1996). La mayoría de los FAN en agua dulce son debidos a las cianobacterias. Estos microorganismos son altamente eficientes y adaptables a diversos ambientes, tienen diversidad morfológica, pueden presentarse como células aisladas, filamentosas, ramificadas o no ramificadas y algunas agrupadas en colonias. (Prosperi, 1999, 2000; Ikawa y Sasner, 1990; Whitton et al., 1991); pueden producir una o varias toxinas potentes (Tabla 1) que ingresan al organismo por ingestión directa del agua con floraciones, por contacto a través de la piel, por inhalación o por consumo de animales expuestos a las toxinas (Craig y Holmes 2000; Falconer, 1999).

Las toxinas pueden producir efectos sub-letales (diarreas, vómitos, mareos, trastornos digestivos, etcétera) y convertirse incluso en agentes cancerígenos si la ingesta es prolongada como para considerarse una intoxicación crónica (Roset et al., 2001; Lerda y Prosperi, 1994, 1996). Hay registros en varias partes del mundo donde han causado muerte masiva de animales incluyendo zooplancton, larvas de anfibios, peces, animales de granja, personas y han reducido el uso de cuerpos de agua para consumo humano e industrial (Carmichael, 1981,1992,1994, 1996).

Tabla 1

Relación de toxinas producidas por cianobacterias

| Orden | Especie | Toxinas |
|-----------------|---|--|
| Chroococcales | <i>Coelosphaerium kuetzingianum</i> | Neurotoxinas |
| | <i>Microcystis aeruginos</i> , <i>M. flos-aquae</i> , <i>M. ichthyoblabe</i> , <i>M. Novacekii</i> , <i>M. viridis</i> | Microcistinas |
| | <i>Woronichinia naegeliana</i> | Microcistinas |
| | | Anatoxinas, Cilindrospermopsinas |
| Nostocales | <i>Anabaena cylindrica</i> | Anatoxinas, Cilindrospermopsinas |
| | <i>Chrysochlorum bergii</i> | Microcistinas, Saxitoxinas |
| | <i>Dolichospermum affinis</i> , <i>D. circinalis</i> , <i>D. crassum</i> , <i>D. flos-aquae</i> , <i>D. lemmermannii</i> , <i>D. macrosporum</i> , <i>D. mendotae</i> , <i>D. perturbatum</i> , <i>D. plantónica</i> , <i>D. solitarium</i> . | |
| | <i>Anabaenopsis elenkini</i> , <i>A. milleri</i> . | Anatoxinas, Microcistina |
| | <i>Sphaerospermum aphanizomenoides</i> | |
| | <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> , <i>A. gracile</i> , <i>A. ovalisporum</i> | Anatoxinas, Cilindrospermopsinas, Microcistinas, Saxitoxinas |
| | <i>Cuspidothrix issatschenkoii</i> | |
| | <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> | Cilindrospermopsinas, Saxitoxinas |
| | <i>Raphidiopsis curvata</i> ; <i>R. mediterranea</i> | Anatoxinas, Cilindrospermopsinas, Saxitoxinas |
| | | |
| Oscillatoriales | <i>Limnothrix redekei</i> | Microcistinas |
| | <i>Planktothrix agardhii</i> ; <i>P. isothrix</i> , <i>P. rubescens</i> | Anatoxinas, Microcistinas, Saxitoxinas |

Fuente: Bell y Codd (1994), Sivonen (1996), Vasconcelos (1999), Beasley et al. (2000), Kinnear (2010), Fastner et al. (1999).

Las microcistinas son consideradas como potentes hepatotoxinas, las cuales se pueden presentar en más de 90 variantes químicas con diferentes niveles de toxicidad (Niedermeyer, 2014); su estructura molecular, representa un reto para su eliminación en las plantas de tratamiento de agua, debido principalmente a su estructura cíclica y a sus características recalcitrantes. En el caso de una intoxicación aguda, el hígado resulta ser el órgano más afectado, presentando una necrosis

hemorrágica extensa y una disrupción sinusoidal (Beasley et al., 2000; Kaya, 1996) este cuadro da lugar a la muerte de la persona. Uno de los eventos más grandes de pérdidas humanas por intoxicación de microcistinas fue en Brasil al intoxicarse 60 pacientes dializados con agua contaminada, muriendo por fallo hepático debido a que el agua utilizada para el tratamiento provenía de un depósito contaminado por cianobacterias (Jochimsen et al., 1998).

La cilindrospermopsina es una toxina conformada por un alcaloide tricíclico derivado de la guanidina unido a un grupo hidroximetiluracilo (Ohtani et al., 1992; Chiswell, 1999). Su toxicidad se deriva por efecto de inhibición irreversible en la síntesis de proteínas (Frosio et al., 2001; Looper et al., 2005), así como por genotoxicidad por fragmentación del ADN, demostrada en modelos in vitro e in vivo (Bazin et al., 2010; Humpage et al., 2005; Shen et al., 2002). En cuanto a los registros sobre afectaciones a seres humanos, el caso más importante se reportó en una localidad de Australia, Palm Island, donde se observó que los afectados sufrían una inusual hepatoenteritis, que cursaba inicialmente con hepatomegalia, constipación, vómitos y dolor de cabeza, seguido todo ello de hemorragias y pérdida de proteínas, electrolitos y glucosa a través de la orina, con signos variables de deshidratación (Bourke et al., 1983; Griffiths y Saker, 2003).

La anatoxina-a es una amina secundaria bicíclica, una de las cianotoxinas más poderosas de las que se pueden encontrar en agua dulce (Kotak y Zurawell, 2007). El primer registro de intoxicación por anatoxina-a se produjo en Canadá en los años 60, donde causó la muerte de ganado vacuno. Su elevada actividad neurotóxica se debe a que es un agonista de la acetilcolina, lo que bloquea el canal de sodio e impide la repolarización de la membrana, causando sobreestimulación muscular que provoca convulsiones, parálisis y finalmente la muerte por paro cardiorrespiratorio (Lucena, 2008). Una variante química de esta toxina es la anatoxina-a (S). La intoxicación provoca bradicardia, sudores, vista turbada, lagrimeo, secreción bronquial excesiva, disnea, tos, vómitos, dolor abdominal, diarrea, incontinencia urinaria, taquicardia, hipertensión, dilatación de las pupilas, debilidad muscular, agitación, confusión y coma. Esta toxina tiene un mecanismo de acción semejante a la anatoxina-a, impidiendo la degradación de la acetilcolina ligada a los receptores nerviosos (Monserrat et al., 2001).

Las saxitoxinas son un grupo de neurotoxinas con alrededor de 26 variantes, son producidas en su mayoría por dinoflagelados de los géneros *Alexandrium*, *Pyrodinium bahamense* var. *compresum* y *Gymnodinium catenatum* y algunas cianobacterias de los géneros *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Cylindrospermopsis* y *Planktothrix*. La sintomatología ocasionada por la saxitoxina y sus derivados se centra en el sistema nervioso, ya que al bloquear los canales de sodio produce parálisis; puede ser tan leve como

adormecimiento de labios hasta la muerte por falla respiratoria (Landsber, 2002). Las toxinas paralizantes alteran específicamente el transporte del ion sodio, pues son capaces de unirse fuertemente a la proteína de membrana denominada canal de sodio que está presente en casi todas las células de mamíferos, aves, peces anfibios y también en invertebrados, como los moluscos bivalvos. Así, el bloqueo de los canales de sodio daña el funcionamiento celular, inhibiendo las señales eléctricas que mantienen trabajando toda nuestra actividad nerviosa superior, vegetativa y la comunicación sináptica (Mons et al., 1998).

Las saxitoxinas son absorbidas rápidamente a través de la mucosa oral y gastrointestinal. La dosis letal mínima es de 9 µg/kg, siendo más potente que el cianuro de sodio, cuya dosis letal mínima es de 10 000 µg/kg. La severidad de los síntomas y la progresión dependen del tamaño de la dosis, susceptibilidad del individuo y del grado de eliminación de las toxinas, la cual es excretada principalmente en la orina (Stafford y Hines, 1995).

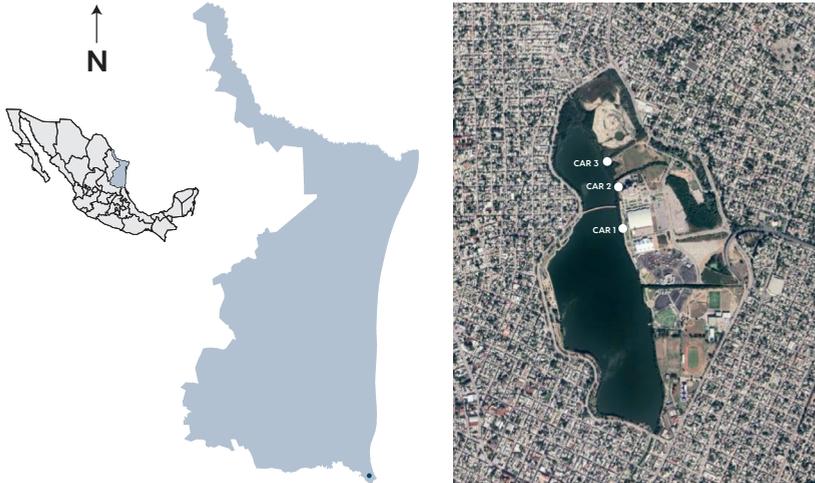
Debido a la problemática ambiental y el riesgo latente en cuanto a toxinas en FAN en cuerpos de agua interiores, se deben realizar programas de monitoreo ya que los problemas que se generan son principalmente de salud que pueden afectar a los usuarios y lugareños, que ocupan estos reservorios como zonas seguras para recreación, deporte y disponen del agua para riego de cultivos agrícolas y abrevadero de animales domésticos y de granja. Por tanto, en este trabajo presentamos un caso de estudio y una perspectiva sobre las acciones que se pueden seguir para mitigar el efecto de estos.

Caso de estudio: laguna del Carpintero

La laguna del Carpintero es un cuerpo de agua natural que se encuentra en el centro de la ciudad y puerto de Tampico, Tamaulipas, forma parte de los humedales de la desembocadura del río Pánuco, de la Cuenca Baja, con una extensión aproximada de 77 ha de cuerpo de agua y se encuentra inmersa dentro de Tampico (Figura 1). Se comunica con el río Pánuco a través del Canal de la Cortadura y antes de ser transformada la laguna, contaba con varios canales que la comunicaban con otras, sin embargo, han desaparecido. En la actualidad tiene una longitud promedio de 2000 m, un ancho promedio de 400 m, un área de 90.4 ha y una profundidad promedio de 1.2 m, aproximadamente (Martínez del Ángel, 2005; Sánchez y Batres-González, 2006a, 2006b; Batres-González et al., 2010; Crisóstomo-Vázquez et al., 2016).

Figura 1

Laguna del Carpintero



Fuente: Tomado de Crisóstomo-Vázquez et al. (2016).

Esta laguna a lo largo de 100 años ha sido gradualmente impactada, ya que ha sido rellenada de escombros, de arena de mar, fue cuerpo receptor de descargas de aguas residuales municipales por más de 20 años, recibiendo de los canales pluviales aproximadamente un gasto de 450 l/s. Y actualmente sigue recibiendo aguas negras a través de descargas clandestinas. La circulación de agua se debe a las mareas y vientos (Martínez del Ángel, 2005; Sánchez y Batres-González, 2006a, 2006b; Batres-González et al., 2010; Crisóstomo-Vázquez et al., 2016).

Alberga una gran cantidad de aves migratorias, entre ellas el ibis blanco (*Eudocimus albus*), y algunas especies bajo protección, como el cocodrilo de pantano (*Crocodylus moreletti*) y la iguana (*Iguana iguana*), así como tres especies de mangle rojo (*Rhizophora mangle*), negro (*Avicennia germinans*) y blanco (*Laguncularia racemosa*) (Batres-González et al., 2010). Y según resultados del índice trófico (IT) se ubica la laguna como un ambiente eutrófico (Crisóstomo-Vázquez et al., 2016) y presenta alteraciones en salinidad según la época del año lo cual afecta la presencia y diversidad de especies tanto micro como macroscópicas.

La laguna del Carpintero debido a su excelente ubicación dentro de la ciudad de Tampico ha tomado mayor importancia en los últimos años para desarrollo del sector turístico y se le ha reconocido su alto valor paisajístico y ambiental y aunque actualmente se prohíbe la pesca y el contacto directo con el agua (Sánchez y Batres-González, 2006b) aún se practican muchas actividades

en ella ya que cuenta con áreas recreativas y de esparcimiento familiar, así como un amplio corredor de áreas verdes para la realización de ejercicios al aire libre, como atletismo, yoga e incluso ha sido escenario para celebrar eventos deportivos internacionales como la Nauticopa en su edición 2011 y 2012.

Y como uno de los atractivos de la zona y detonante del crecimiento turístico del puerto de Tampico, Tamaulipas, la laguna sigue siendo motivo de diversos debates en el ámbito ecológico, debido a que requiere de acciones encaminadas a su saneamiento; toda vez que fungió y aún sigue siendo en menor escala, como un vaso captador de aguas negras provenientes del centro de la ciudad.

Metodología

Los muestreos se realizaron con red de fitoplancton y toma directa con botella; en laboratorio se identificaron las especies presentes con ayuda de microscopía de luz y la identificación de las especies se llevó a cabo utilizando literatura especializada (Margain-Hernández, 1989; Round et al., 1990; Komárek y Jankovská 2001; Komárková y Tavera, 2003; Wehr y Sheath, 2003). Los conteos se hicieron en una cámara de Sedgwick Rafter en un microscopio invertido marca Zeiss (Arredondo-Vega y Voltolina, 2007).

Resultados y discusión

Desde el año 2008 se han realizado estudios periódicos en la laguna enfocados en calidad de agua, composición fitoplanctónica, metales y nutrientes presentes (Crisóstomo-Vázquez et al., 2016) y a partir del 2015, se tienen registros de FAN, originados por el crecimiento desmesurado de la cianobacteria *Microcystis aeruginosa* (Figura 2).

Figura 2

Imágenes del FAN en la laguna (a y b); *Microcystis especie formadora* (c)



Fuente: elaboración propia.

Microcystis es productora de microcistinas (Tabla 1) potente hepatotoxina, con más 90 variantes químicas y pueden causar debido a exposición prolongada, daño hepático, tumores, muerte del organismo (Niedermeyer et al., 2014); durante los florecimientos las concentraciones celulares variaron según el punto y la fecha de muestreo, pero se encontraron en el orden de 616 556 hasta más de 1 000 000 células/ml. Según la OMS de 100.000 a 1.000.000 cel/mL en esta especie se clasifica como florecimiento de nivel alto con riesgo para la salud.

Tabla 2

Diversidad fitoplanctónica a lo largo de una línea de tiempo

Tabla modificada de Crisóstomo-Vázquez et al., 2016

| | Morales-Cruz 1985 | Ortiz-Rosales 1997 | Crisóstomo et al.,2007* | Presente estudio 2015 |
|-----------------|----------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|
| Clases | 4 | 6 | 10 | 3 |
| Géneros | 28 | 138 | 52 | 8 |
| Especies | 30 | 178 | 68 | 10 |
| Divisiones | | | | |
| Clorofita | 12 | 67 | 24 | 6 |
| Euglenofita | 0 | 6 | 3 | 0 |
| Dinoflagelados | 3 | 4 | 5 | 0 |
| Heterocontofita | 8 | 76 | 22 | 2 |
| Cianobacteria | 7 | 25 | 14 | 2 |

Fuente: elaboración propia.

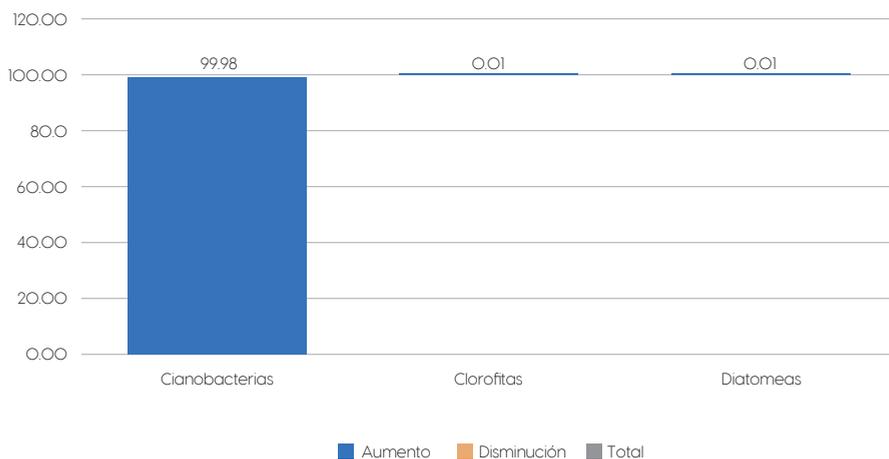
Las especies presentes durante los florecimientos del 2015 fueron: de la clase *Cyanophyceae*: *Anabaena flos-aquae* (Lyngby) Breb. ex Bornet y Flahault; *Microcystis aeruginosa* (Kütz.) Kütz; de la Clase *Chlorophyceae*; *Ankistrodesmus falcatus* (Corda) Ralfs; *Chlorella vulgaris* Beyerinck (Beijerinck); *Desmodesmus quadricauda* (Turpin) Hegewald; *Kirchneriella obesa* (G.S.West) West y G.S.West; *Monoraphidium contortum* (Thuret) Komàrková-Legnerová; *Scenedesmus sp.* Meyen y de la Clase *Bacillariophyceae*: *Navicula lanceolata* (Agardh) Ehrenberg; *Pleurosigma sp.* W.Smith, 1852. Siendo la cianobacteria *Microcystis* dominante en un 99% en los muestreos periódicos.

Referente a las comunidades fitoplanctónicas Morales (1985) en su estudio, logró identificar 30 especies (Tabla 2), de las cuales el grupo de las clorofitas resultó de mayor abundancia con 12 especies, seguido por las crisofitas, cianobacterias y pirrófitas con 8, 7 y 3 especies respectivamente. Relacionado a florecimientos algales nocivos, el autor refiere dos eventos de relevancia importante, de clorofitas

en abril, julio y noviembre y de cianobacterias en junio y septiembre, donde las especies dominantes fueron *Microcystis* y *Anabaena* en una concentración celular de 899 826 cel/mL.

Figura 3

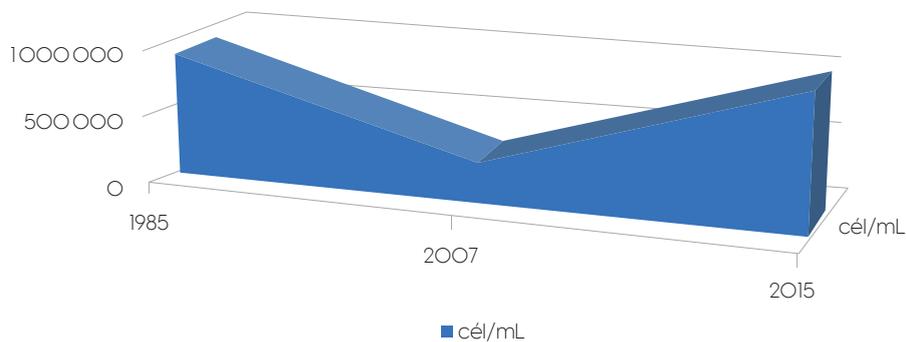
Porcentaje de los grupos algales presentes en el año 2015



Fuente: elaboración propia.

Figura 4

Abundancia de cianobacterias en una línea de tiempo



Fuente: elaboración propia.

Crisóstomo-Vázquez et al. (2016) reportaron en un estudio más reciente el registro de 68 especies (Tabla 2), de las cuales se destacan los grupos, bacilariofitas, clorofitas y cianobacterias, como los de mayor predominancia respectivamente. Sin embargo, durante el año de estudio no se presentaron florecimientos algales (Tabla 4). Los autores sugieren que el incremento en la taxa, con respecto a estudios anteriores, es debido a los cambios ambientales que ha sufrido la laguna, como por ejemplo el incremento a la salinidad aunado a la disponibilidad de nutrientes, así en este último estudio se reportó la presencia de las especies *Desmodesmus quadricauda* y *Chlorella vulgaris* en todo el periodo de monitoreo, especies con una alta tolerancia a los cambios ambientales (Rodríguez-Palacio et al., 2011).

Los estudios en donde se observe y registre la dinámica poblacional del fitoplancton en la laguna del Carpintero, son primordiales para poder establecer un diagnóstico sobre el estado que guarda este cuerpo de agua y sobre todo para poder establecer modelos que nos permitan entender las condiciones de la laguna que detonan los florecimientos algales nocivos. Ya que las especies de cianobacterias que pueden generar riesgo para la salud han estado presentes en la laguna en altas concentraciones y generando florecimientos algales nocivos (Tabla 4) a lo largo de la evolución de este cuerpo de agua sin que se tomen medidas de prevención, control y mitigación.

En el trabajo del 2015 se observa cómo la diversidad se ve altamente impactada ante la presencia de un FAN de *Microcystis* (Tabla 2, Figura 3) mismo que se extendió por más de tres meses en la laguna, lo cual es indicativo de un sistema eutrófico y aunque se debe resaltar que estos resultados corresponden a muestreos puntuales y que son indicativos de una situación ambiental particular, pueden mostrar una situación general y orientar futuras acciones.

Este cuerpo de agua como muchos otros que presentan la misma problemática ambiental debe someterse a un plan de monitoreo para tomar medidas de prevención control y mitigación, pudiendo tomar como ejemplo algunos programas internacionales como Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms GEOHAB que estudian los FAN enfocándose en los mecanismos ecológicos que participan en la dinámica de las especies nocivas; asimismo estudian la biodiversidad y biogeografía, nutrientes y eutrofización, estrategias de adaptación, comparación de ecosistemas y por último, conjugando todo lo anterior, observación, modelado y predicción (<http://geohab.org/>).

Si seguimos un programa como el mencionado nos pueden llevar a un excelente manejo de la laguna, pero muchas veces la falta de recursos o de interés conlleva a que estos programas no se lleven a cabo. Por tanto, el primer paso para tener éxito en un programa de esta naturaleza es desarrollar medios de capacitación

y difusión de la información al público, con miras a aumentar la percepción del riesgo en un marco adecuado y reducir la probabilidad de ocurrencia de daños.

Una vez capacitada la población se considera pertinente realizar monitoreos visuales de las acumulaciones de algas (Figura 2) en las inmediaciones de las zonas de la laguna. Se puede pedir a la población que dé una alerta temprana cuando la decoloración de la laguna empiece a cambiar hacia un verde más intenso al formarse natas verdes en algunas zonas de la laguna. La participación del público en el monitoreo de las cianobacterias es de vital importancia, por lo que se debe educar sobre la apariencia y la toxicidad de las acumulaciones.

Adicionalmente, el gobierno y academia deben proponer un programa de monitoreo periódico de la laguna como acción inmediata, ya que se considera de vital importancia la realización de estudios limnológicos sistemáticos en el área, a fin de poder interpretar la dinámica del ecosistema y poder conocer las causas que generan las floraciones, pudiendo prevenir y controlar este tipo de problemas.

Se deberá señalar el lugar con avisos de riesgo; se deberán colocar letreros en la zona y en dar anuncios en los medios de comunicación que digan explícitamente *Evite el contacto con las biopelículas: repórtelas a los siguientes teléfonos, e-mails o página web.*

Perspectivas

Los proyectos en el futuro inmediato deberían explorar alternativas para el tratamiento de aguas residuales, para disminuir la entrada de contaminantes al sistema y realizar investigación aplicada con microorganismos en condiciones de cultivo y medidas de mitigación y control, que sea amigables con el ambiente, de tal manera que el impacto sea mínimo y se amortigüe por la suma de beneficios. Los estudios enfocados en prevención manejo, control y mitigación deben ser prioritarios para el buen manejo de este ecosistema que está altamente impactado por el hombre y es importante para la zona de Tampico.

Referencias

- Arredondo-Vega, B., y Voltolina D. (2007). *Métodos y Herramientas Analíticas en la Evaluación de la Biomasa Microalgal*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, México. (2007), 97.
- Batres-González J., Ortella-Cabrera V., y Lorenzo-Palomara J. (2010). Diseño y Ordenamiento de la dinámica urbana, medio includible en la preservación sustentable de los recursos hídricos naturales urbanos en México. Caso lagunas urbanas del sur de Tamaulipas (Tampico- Madero-Altamira). *Quívora*, 1, (12): 1-13.

- Bazin E., Mourot A., Humpage A., y Fessard V. (2010). Genotoxicity of a freshwater cyanotoxin, cylindrospermopsin, in two human cell lines: Caco-2 and HepaRG. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 51(3): 251-9.
- Beasley V., Lovell R., Holmes, K., Walcott, H., Schaeffer, D., y Hoffmann, W. (2000). Microcystin-LR decreases hepatic and renal perfusion, and causes circulatory shock, severe hypoglycemia, and terminal hyperkalemia in intravascularly dosed swine. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 61, 281-303.
- Bell, S., y Codd, G. (1994). Cyanobacterial toxins and human health. *Reviews in Medical Microbiology* 5, 256-264.
- Bourke, A., Hawes, R., Neilson, A., y Stallman, N. (1983). An outbreak of hepatoenteritis (the Palm Island mystery disease) possibly caused by algal intoxication. *Toxicon* 3 (1983), 45-48.
- Carlson, R. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22 (1977), 361-369.
- Carmichael, W. (1992). Cyanobacteria secondary metabolites, the cyanotoxins. *Journal of Applied Bacteriology*, 72, 445-459.
- _____. (1981). *The water environment: Algal toxins and health*. Plenum Press, New York.
- _____. (1981). Estados Unidos. (1981), 491.
- _____. (1994). The Toxins of Cyanobacteria. *Scientific American*, 270, 78-86.
- _____. (1996). Toxic Microcystis and the Environment. In: Watanabe M.F., Harada K., Carmichael W.W., Fujiki H. *Toxic Microcystis*. CRC Press, Boca Raton, Florida, Estados Unidos, 1-11.
- Chiswell, R., Shaw, G., Eaglesham, G., Smith, M., Norris, R., Seawright, A., y Moore, M. (1999). Stability of cylindrospermopsin, the toxin from the cyanobacterium, *Cylindrospermopsis raciborskii*: *Effect of pH, temperature, and sunlight on decomposition*. *Environmental Toxicology*, 14(1), 155-61.
- Christoffersen, K. (1996). Ecological implications of cyanobacterial toxins in aquatic food webs. *Phycologia*, 35, 42-50.
- Codd, G. (1998). Cyanobacterial Blooms and Toxins in Fresh, Brackish and Marine Waters. En: Reguera B., Blanco J., Fernández M.L., Wyatt T., Harmful Algae Xunta de Galicia and Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, 13-17.
- Craig, M., y Holmes, C. (2000). Freshwater hepatotoxins. Microcystin and Nodularin, mechanisms of toxicity and effects on health. In: Botana L. M., Marcel D., Seafood and freshwater toxins: pharmacology, physiology and detection. New York, Estados Unidos, 643-672.

- Crisóstomo-Vázquez L., Alcocer-Morales C., Lozano-Ramírez C., Rodríguez-Palacio, M. (2016). Fitoplancton de la laguna del Carpintero Tampico, Tamaulipas, México. *Interciencia* 4(2), 103-109.
- Falconer, I. (1999). An overview of problems caused by toxic Blue-Green Algae (Cyanobacteria) in drinking and recreational water. *Environmental Toxicology*, 14, 5-12.
- Fastner, J., Neumann, U., Wirsing, B., Weckesser, J., Wiedner, C., Nixdorf, B., y Chorus, I. (1999). Microcystins (Hepatotoxic Heptapeptide) in German Fresh Water Bodies. *Environmental Toxicology*, 14, 13-22.
- Frosco, S. Humpage, A., Burcham, P., y Falconer, I. (2001). Cell-free protein synthesis inhibition assay for the cyanobacterial toxin cylindrospermopsin. *Environmental Toxicology*, 16(5), 408-12.
- Griffiths, D., y Saker, M. (2003). The Palm Island mystery disease 20 years on: a review of research on the cyanotoxin cylindrospermopsin. *Environmental Toxicology*, 78-93.
- Humpage, A., Fontaine, F., Frosco, S., Burcham, P., y Falconer, I. (2005). Cylindrospermopsin genotoxicity and cytotoxicity: role of cytochrome P-450 and oxidative stress. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 68(9), 739-53.
- Ikawa, M., y Sasner, J. (1990). The chemistry and physiology of algal toxins. In: Akatsuka I., *Introduction to applied psychology* SPB Academic Publishing bv. The Hague, The Netherlands.
- Jochimsen, E., Carmichael, W., An, J., Cardo, D., Cookson, S., Holmes, C., Antunes, M., de Melo Filho, D., Lyra, T., Barreto, V., Azevedo, S., Jarvis, W. (1998). Liver Failure and death after exposure to Microcystins at a Hemodialysis Center in Brazil. *The New England Journal of Medicine*, 338, 873-878.
- Karydis, M., Ignatiades, L., y Moshopoulou, N. (1983). An index associated with nutrient eutrophication in the marine environment. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 16, 339-344.
- Kaya, K. (1996). Toxicology of Microcystins. In: Watanabe M. F., Harada K., Carmichael W. W., Fujiki H. *Toxic microcystis*. CRC Press, Boca Ratón, Florida, Estados Unidos, 175- 202.
- Kinnear, S. (2010). Cylindrospermopsin: a decade of progress on bioaccumulation research. *Marine Drugs* 8 (3), 542-64.
- Komárek J., y Jankovská V. (2001). Review of the green algal genus *Pediastrum*; implication for pollen analytical research. *Bibliotheca Phycologica*, 108-127.
- Komárková J., Y Tavera R. (2003). Steady state of phytoplankton assemblage in the tropical lake Catemaco (México). *Hydrobiologia*, 502, 187-196.

- Kotak, B., y Zurawell R. (2007). Cyanobacterial toxins in Canadian freshwaters: A review. *Lake and Reservoir Management*, 23, 109-122.
- Landsber, J. (2002). The Effects of Harmful Algal Blooms on Aquatic Organism. *Reviews in Fisheries Science*, 10, 113-390.
- Lerda, D., y Prospero, C. (1994). *Consideraciones sobre la potabilización del agua para consumo humano en río Tercero (Córdoba-Argentina). Parte 1*. Municipalidad de Marcos Juárez. Córdoba, 42.
- _____. (1996). Water mutagenicity and toxicology in río Tercero (Córdoba, Argentina) *Water Research* 30(4), 819-824.
- Looper, R., Runnegar, M., y Williams, R. (2005). Synthesis of the putative structure of 7- deoxycylindrospermopsin: C7 oxygenation is not required for the inhibition of protein Synthesis. *Angewandte Chemie International Edition*, 44,3879-3881.
- Lucena, E. (2008). Aspectos sanitarios de las cianotoxinas. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 8, 291-302.
- Margain-Hernández, R. (1989). Lista ficoflorística de la cuenca del río Pánuco, México. I. Cuerpos de agua temporales (Regiones Oriental y Sur). *BIOTAM* 1(3), 24-38.
- Martínez-del Ángel, A. (2005). Modelación Numérica de la Hidrodinámica de la laguna del Carpintero. Tesis. Universidad Autónoma de Tamaulipas. México, 77.
- Mons, M., Van Egmond, H., y Speijers G. (1998). Paralytic shellfish poisoning: A review. *RIVM Report 388802 005*.
- Monserrat, J., Yunes, J., y Bianchini, A. (2001). Effects of Anabaena spiroides (cyanobacteria) aqueous extracts on the acetylcholinesterase activity of aquatic species. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 20, 1228-35.
- Morales-Cruz, J. (1985). *Contribución al conocimiento del fitoplancton de la laguna del Carpintero Tamps*. Tesis. Universidad del Noreste. Tamaulipas, México.
- Niedermeyer, T., Daily, A., Swiatecka-Hagenbruch, M., y Moscow, J. (2014). Selectivity and potency of microcystin congeners against OATP1B1 and OATP1B3 expressing cancer cells. *PLoS one*, 9, e91476. DOI:10.1371/journal.pone.0091476
- Ohtani, I., Moore, R., y Runnegar, M. (1992). Cylindrospermopsin: A Potent Hepatotoxin from the Blue Green Alga Cylindrospermopsis raciborskii. *Journal of American Chemistry Society*, 114(20): 7941-2.
- Park H., y Watanabe, M. (1996). Toxic Microcystis in Eutrophic Lakes. In: Watanabe M.F., Harada K.H., Carmichael W.W., Fujiki H., *Toxic Microcystis*. CRC Press, Boca Raton, Estados Unidos, 57-77.
- Prospero, C. (2000). Cyanobacteria in human affairs. *Interciencia*, 25(6), 303-306.
- _____. (1999). *Las algas microscópicas y su efecto sobre el ambiente*. Universidad Libre del Ambiente. 1, 2-6.

- Rodríguez-Palacio, M., Crisóstomo-Vázquez, L., Álvarez-Hernández, S., y Lozano-Ramírez C. (2011). Strains of toxic and harmful microalgae from wastewater, marine, brackish and fresh water. *Food Additives & Contaminants, Part A*, 304-313.
- Roset, J., Aguayo, S., y Muñoz, M. (2001). Detección de cianobacterias y sus toxinas. Una revisión. *Revista de Toxicología*, 18, 65-71.
- Round, F., Crawford, R., y Mann, D. (1990). *The Diatoms: Biology and Morphology of the Genera*. Cambridge University, Estados Unidos.
- Sánchez, D., y Batres González, J. (2006b). *Planeación y desarrollo del espacio urbano de la laguna del Carpintero, municipio de Tampico, Tamaulipas (México)*. Congreso Internacional de la Red de Estudios Municipales, México.
- _____. (2006a). *Ordenación territorial y medioambiental de las actividades turísticas en las lagunas urbanas de Tamaulipas (México). El caso de la laguna del Carpintero en Tampico, Tamaulipas*. VIII Congreso Nacional y 2º Internacional de Investigación Turística Ciudad de Monterrey, México.
- Shen, X., Lam, P., Shaw, G., y Wickramasinghe, W. (2002). Genotoxicity investigation of a cyanobacterial toxin, cylindrospermopsin. *Toxicon*, 40(10), 1499-501.
- Sivonen, K. Cyanobacterial toxins and toxin production. *Phycologia*, 35, 12-24.
- Stafford, R., y Hines, H. (1995). Urinary elimination of saxitoxin after intravenous injection. *Toxicon*, 53, 1501-10.
- Vasconcelos, V. (1999). Cyanobacterial toxins in Portugal: effects on aquatic animals and risk for human health. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 32, 249- 254.
- Wehr, J., y Sheath, R. (2003). Freshwater Algae of North America. *Ecology and Classification*. Academic Press. 935.
- Whitton, B., Rott, E., y Friedrich, G. (1991). *Use of algae for monitoring rivers*. University of Innsbruck. Austria, 156.

Disponibilidad futura del recurso hídrico en la cuenca del río Tamesí

Dora María Esther González Turrubiates¹

Gabriel Arcos Espinosa²

Esperanza Martínez Cano³

Alfonso Gutiérrez López⁴

Resumen

El objetivo principal de este estudio es determinar la disponibilidad del recurso hídrico con base en la generación de escenarios climáticos de precipitación obtenidos de cinco modelos de circulación general. Estos modelos son CNRM-CM5, HADGEM2-ES, MPI-ESM-LR, GFDL-CM3 y el ensamble ponderado REA; para dos horizontes de tiempo futuro medio 2039-2045 y lejano 2075-2099; y dos Forzamientos o Trayectorias de Concentraciones Representativas RCP-4.5 y RCP-8.5. La metodología utilizada para la estimación de la disponibilidad del recurso hídrico es un método complementario a la NOM-011-CNA-2015, que considera la variación mensual del proceso hidrológico lluvia- escurrimiento. El análisis se realizó en la cuenca del río Tamesí en la Región Hidrológica 26 río Pánuco en México, y consideró todos los volúmenes de agua, entradas y salidas, que intervienen en el balance hídrico. Los resultados obtenidos, para ambos horizontes de tiempo, muestran una falta de disponibilidad en dos de sus cuatro subcuencas, principalmente durante la época de estiaje, de noviembre a abril. Las subcuencas que muestran disponibilidad se ven reducidas hasta en un 20% en los meses de avenida.

Palabras clave: disponibilidad, recurso hídrico, río Tamesí, cambio climático

^{1 2 3} Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller”, Universidad Autónoma de Tamaulipas. México.
dgonzale@docentes.uat.edu.mx

⁴ Universidad Autónoma de Querétaro. Centro de Investigaciones del Agua, Facultad de Ingeniería,
México. alfonso.gutierrez@uaq.mx

Introducción

La humanidad es protagonista de los efectos que las condiciones extremas del cambio climático global están ocasionando en la Tierra, y una de las mayores preocupaciones del buró científico y de la sociedad en general se refiere a sus efectos en la disponibilidad de los recursos hídricos. Se estima que el incremento en la temperatura en los escenarios más probables de cambio climático tendrá importantes repercusiones en el ciclo hidrológico, global y local (Martínez-Austria et al., 2012).

Por normatividad (Semarnat, 2015), en México, la disponibilidad de agua se estima en forma anual (NOM-011-Conagua-2015), enfoque correcto, pero que no toma en cuenta la variabilidad de los escurrimientos superficiales. Esto quiere decir, que el valor de la disponibilidad de agua estimado es uniforme para todo el año, algo irreal en una cuenca hidrológica. Sin embargo, en las especificaciones generales de la NOM-011-Conagua-2015 se menciona que el método base de esta norma es el “requerimiento técnico mínimo obligatorio y no excluye la aplicación adicional de métodos complementarios o alternos más complicados y precisos, cuando la información disponible así lo permita” (Semarnat, 2015). Consecuentemente, en este estudio se emplea un método complementario, más completo y preciso, que permite observar la variabilidad mensual en la disponibilidad de agua. El método propuesto para realizar esta estimación se denomina Método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS-CN, en inglés).

Finalmente, el objetivo de este capítulo es estimar la disponibilidad del agua media mensual ante escenarios de cambio en la precipitación en la cuenca del río Tamesí, ubicada en la Región Hidrológica 26 río Pánuco, en México. Para lograr este objetivo general, se establecieron cuatro objetivos específicos: (1) Determinar el escenario base de la precipitación o régimen de precipitación mensual base. (2) Generar los escenarios de cambio climático en la precipitación mensual. (3) Estimar el balance hídrico mensual base o estimación de la disponibilidad de agua, considerando la variación mensual. (4) Aplicar los escenarios de cambio y determinar la disponibilidad de agua mensual.

Métodos y materiales

La metodología aplicada consistió en responder cada objetivo . A continuación, se describe el método empleado para cada uno de los objetivos.

Escenario base y escenarios futuros de precipitación mensual

Para determinar el escenario base de precipitación se utilizó la climatología desarrollada por Hijmans et al. (2005) y disponible en WorldClim-Global Climate Data. WorldClim tiene datos climáticos mensuales promedio para temperaturas

mínimas, medias y máximas y para precipitaciones con una resolución temporal de 1950-2000 y una resolución espacial de 30" x 30" (aprox. 1 km²).

Para la representación de los escenarios de cambio en la precipitación se han empleado las proyecciones de cambio climático desarrolladas por la Unidad de Informática para la Ciencias Atmosféricas (UNIATMOS) del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático en México (UNIATMOS-INECC, 2020). Por recomendación del INECC se han utilizado cuatro AOGCM: CNRM-CM5 (Francia), HADGEM2-ES (Reino Unido), MPI-ESM-LR (Alemania), GFDL-CM3 (EE.UU.) y el ensamble ponderado denominado Reliability Ensemble Averaging REA (México); más dos horizontes de tiempo (futuro medio 2045-2069 y futuro lejano 2075-2099) y dos Forzamientos o Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP-4.5 y RCP-8.5).

Estimación del balance hídrico

La NOM-011-Conagua-2015 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat, 2015) establece “el método base para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales y subterráneas, para su explotación, uso o aprovechamiento”. Sin embargo, si bien el método base es correcto en lo general, muestra una deficiencia al no considerar la variación mensual de los escurrimientos superficiales y las recargas de acuíferos en una cuenca hidrológica. Lo cual quiere decir que la diferencia entre los escurrimientos en la época de estiaje y la época de avenidas en una cuenca se desprecia, dando por resultado un valor de disponibilidad de agua uniforme para todo el ciclo anual, lo cual no es real en una cuenca hidrológica.

La NOM-011-Conagua-2015 también menciona que este método base es el “requerimiento técnico mínimo obligatorio y no excluye la aplicación adicional de métodos complementarios o alternos más complicados y precisos, cuando la información disponible así lo permita” (Semarnat, 2015). Por lo tanto, la metodología que se establecerá durante el desarrollo de este estudio precisamente será un método complementario, más completo y preciso. Así entonces, la NOM-011-Conagua-2015 establece que la disponibilidad media anual de agua superficial en una cuenca hidrológica está dada por la siguiente expresión (Semarnat, 2015):

$$DMA = VMA_2 - VAA_2 \quad \text{ec. (1)}$$

donde:

DMA = disponibilidad media anual de agua superficial en la cuenca hidrológica.

VMA_2 = volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo.

VAA_2 = volumen anual actual comprometidas aguas abajo.

Y el volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo (VMA_2) está dado por la siguiente expresión (Semarnat, 2015):

$$VMA_2 = VMA_1 + VMN + VAR + VAI - VAExp - VAExt - VAEE - VAVE \quad \text{ec. (2)}$$

donde:

VMA_1 = volumen medio anual de escurrimiento desde la cuenca aguas arriba.

VMN = volumen medio anual de escurrimiento natural.

VAR = volumen anual de retornos.

VAI = volumen anual de importaciones.

$VAExp$ = volumen anual de exportaciones.

$VAExt$ = volumen anual de extracción de agua superficial.

$VAEE$ = volumen medio anual de evaporación en embalses.

$VAVE$ = volumen medio anual de variación de almacenamiento en embalses.

Como ya se mencionó, este enfoque anual para estimar la disponibilidad de agua en una cuenca hidrológica no es el más adecuado debido a que no toma en cuenta la variación mensual del proceso lluvia-escurrimiento. La metodología que se propone y aplica en este estudio toma en cuenta la distribución mensual de dicho proceso hidrológico. Por otra parte, dentro de los diferentes parámetros considerados en las expresiones anteriores para el cálculo de la disponibilidad media anual de agua superficial, el volumen medio anual de escurrimiento natural por cuenca propia es tal vez el más relevante debido a que mediante este parámetro se determina el escurrimiento natural que una cuenca puede aportar al proceso general de balance hídrico en una cuenca hidrológica.

Para calcular el volumen anual de escurrimiento natural se propone trabajar con un método indirecto diferente al descrito en la NOM-011-CONAGUA-2015 pero que también se define por la relación precipitación-escurrimiento. Este método es el Método del Servicio de Conservación de Suelos (Method SCS-CN, en inglés) de los Estados Unidos para estimar el escurrimiento superficial. Existe una extensa cantidad de referencias bibliográficas y de aplicación de este método. Sin embargo, sólo se consideran las publicaciones clásicas en este documento: Chow et al. (1988), Hawkins et al. (2009) y Francisco-Nicolás et al. (2010). La agencia del gobierno de los Estados Unidos, Soil Conservation Service (SCS) propuso este método en 1972 (hoy en día esta agencia se conoce como Natural Resources Conservation

Service (NRCS) el cual estima el escurrimiento medio (Q) mediante la cantidad de precipitación (P) y la retención máxima potencial (S) utilizando valores de curvas numéricas. Las fórmulas a continuación:

$$Q = \frac{(P - 0.25)^2}{P - 0.8S} \quad \text{ec. (3)}$$

donde:

Q = escurrimiento medio por evento (mm).

P = precipitación efectiva por evento (mm).

S = retención máxima potencial (mm).

La condición para aplicar la Ecuación 3 es que $Q > 0$ cuando $P > 0.2S$, de lo contrario $Q = 0$. La retención máxima potencial se obtiene mediante curvas numéricas, de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$Q = \frac{25400}{CN} \quad \text{ec. (4)}$$

donde:

CN = curva numérica (adimensional).

Los valores de CN , se obtienen en función del tipo de suelo y cubierta vegetal, para condiciones de humedad antecedente normal. Los procesos de cálculo que permitieron ir obteniendo los datos necesarios para aplicar el Método SCS-CN y finalmente el balance hídrico fueron:

1. Cálculo del Número de Curva (CN) del Método del SCS. Mediante el procesamiento de información digital del INEGI correspondiente a los tipos de suelo, cobertura vegetal y usos del suelo en la Cuenca del río Tamesí (CRT).
2. Estimación de la precipitación media mensual en la CRT, mediante el Método de Polígonos de Thiessen y a partir de la climatología de Hijmans et al. (2005), para el periodo 1950-2000.
3. Estimación de los volúmenes de escurrimiento superficial medio mensual, mediante el Método del SCS-CN para cada uno de los cuatro tramos que integran la CRT y para el escenario de precipitación base sin impacto de cambio climático (climatología Hijmans).
4. Estimación de la precipitación media mensual en la CRT con impacto de cambio climático (climatología base más/menos anomalías de precipitación), para cada uno de los tramos. Las anomalías de

precipitación correspondieron a los modelos: CNRM-CM5, HADGEM2-ES, MPI-ESM-LR, GFDL-CM3 y el ensamble ponderado denominado REA; más dos horizontes de tiempo (futuro medio 2039-2045 y futuro lejano 2075-2099) y dos Forzamientos o Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP-4.5 y RCP-8.5).

5. Estimación de los volúmenes de escurrimiento superficial medio mensual, mediante el Método del SCS-CN para cada uno de los cuatro tramos de la CRT y para los escenarios de precipitación con impacto de cambio climático.
6. Estimación de la disponibilidad de agua o balance hídrico en la CRT, mediante la aplicación del procedimiento establecido por la NOM-011-Conagua-2015, para los escenarios de precipitación base y de cambio climático. La estimación se realizó en forma mensual en la CRT para mejorar el procedimiento de cálculo del método indirecto de la norma y cambiar el enfoque de una estimación anual del balance hídrico, a una estimación mensual del mismo, para conocer la distribución en el tiempo del proceso lluvia-escurrimiento.

Toda la información generada en cada uno de los pasos anteriores se capturó en una serie de hojas cálculo en Excel en donde fue posible estimar el balance hídrico mensual, para el escenario base (climatología 1950-2000) y para los diferentes escenarios y modelos de cambio climático, para cada una de las cuatro subcuencas que integran la CRT, de acuerdo con los criterios de la Conagua.

Por tanto, la metodología aplicada en este estudio comprendió diferentes procesos de cálculo establecidos en la NOM-011-CNA-2015 en la parte correspondiente a la estimación del balance hídrico mediante el método indirecto, pero incorporando dos cambios fundamentales: (1) el balance hídrico se hizo en forma mensual, para incorporar la variación en el tiempo del escurrimiento superficial, y (2) para el cálculo de la relación lluvia-escurrimiento se aplicó el método del SCS-CN, el cual es más completo y preciso que el método incorporado en la NOM-011-Conagua-2015.

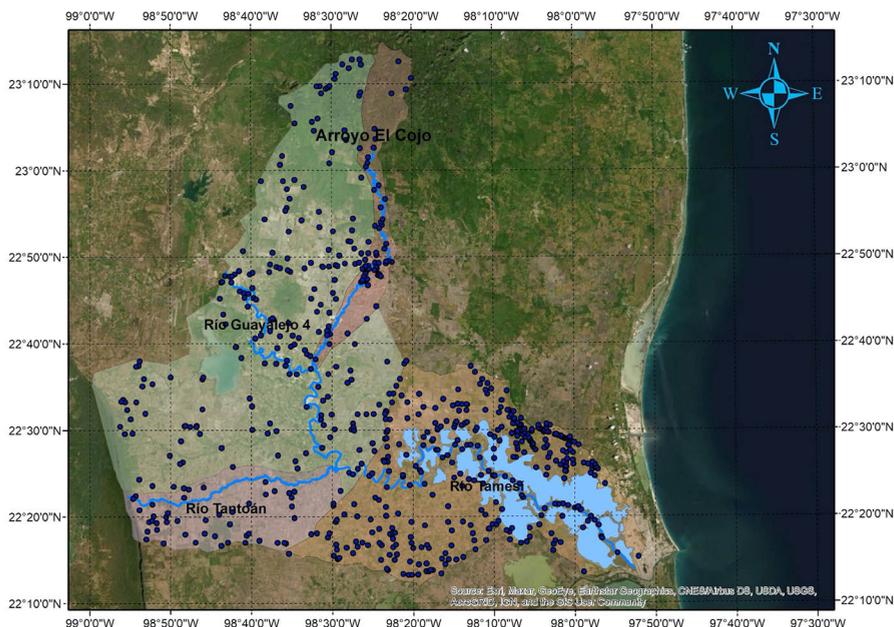
Resultados

La cuenca del río Tamesí (CRT) se localiza entre los paralelos 22°15' y 22°48' de latitud norte y los meridianos 98°19' y 98°23' de longitud oeste en el sur del estado de Tamaulipas, México. Tiene una superficie de 6,088.9 km² y forma parte de la Región Hidrológica 26, cuenca del río Pánuco RH26-río Pánuco (Conagua, 2014). La cuenca riega parte del territorio de ocho municipios de tres entidades

federativas: Altamira, Madero, El Mante, González, Tampico y Xicoténcatl, del estado de Tamaulipas; Tamuín del estado de San Luis Potosí y Pánuco, del estado de Veracruz (Figura 1).

Figura 1

Localización de la cuenca del río Tamesí



Fuente: elaboración propia, a partir de Conagua (2014).

La precipitación media anual en la cuenca para el periodo 1950-2000 fue de 1,337 mm; el mes con mayor precipitación corresponde a septiembre con un promedio mensual de 264.9 mm y el mes con menor precipitación es enero con 20.2 mm. El régimen de precipitación es verano-otoño. La temperatura media anual es de 24.2 °C.

De acuerdo con el último Censo de Población y Vivienda 2020, la población total en la cuenca es de 262 840 habitantes, 668 localidades rurales y 11 localidades urbanas; lo cual estima una densidad de población de 96.72 hab/km². Los principales centros urbanos están ubicados en Tamaulipas y corresponden a Xicoténcatl, Ciudad Mante, Altamira, Tampico y Ciudad Madero.

Las actividades económicas que se desarrollan en la cuenca están vinculadas al sector agrícola e industrial. La cuenca alta se destaca por la presencia del ingenio azucarero de El Mante. En la cuenca baja, las principales actividades están vinculadas con los sectores industrial y petroquímico ubicados en el puerto industrial de Altamira y en la refinería de Pemex en Ciudad Madero.

Para fines de estudios de disponibilidad de agua, la Semarnat (2016), ha dividido a esta cuenca en cuatro tramos o subcuencas hidrológicas: río Guayalejo 4 (3088.9 km²); arroyo El Cojo (400.8 km²), río Tantoán (616.4 km²) y río Tamesí (1982.8 km²). En cada tramo de la CRT se llevan a cabo diferentes actividades económicas que requieren de ciertos volúmenes de agua superficial y subterránea. Por lo tanto, con base en información obtenida del Registro Público de Derechos de Agua (Repda, 2015), e información proporcionada por la Gerencia Regional Golfo Norte de la Conagua y la Comisión Estatal de Agua de Tamaulipas (CEAT) fue posible cuantificar los volúmenes utilizados en los diferentes usos de agua que se tienen actualmente en la CRT: uso público-urbano (72.01 mm³); uso generación de energía eléctrica (93.52 mm³) y uso industria autoabastecida (0.14 mm³).

Disponibilidad de agua actual

De acuerdo con los resultados obtenidos en la estimación de la disponibilidad de agua o balance hídrico, el volumen de oferta o entrada anual del recurso hídrico en la CRT bajo el escenario de precipitación base (1950-2000), es de 15 176.01 mm³ (Millones de metro cúbico). En lo que respecta al volumen de demanda o salida anual en la CRT este es de 2467.54 mm³ (Tabla 1). La diferencia entre estos dos volúmenes determina la disponibilidad de agua anual en la CRT, la cual corresponde a 12 709.07 mm³.

Tabla 1

Volúmenes de entrada y salida anuales por subcuenca en la CRT

| Subcuenca | Volumen Anual (mm ³) | |
|--------------------|----------------------------------|---------|
| | Oferta | Demanda |
| 1. Arroyo El Cojo | 175.41 | 85.32 |
| 2. Río Tantoán | 317.78 | 37.82 |
| 3. Río Guayalejo 4 | 5499.30 | 2245.01 |
| 4. Río Tamesí | 9184.12 | 99.39 |
| Total | 15176.61 | 2467.54 |

Fuente: elaboración propia, a partir de los resultados de la estimación de disponibilidad de agua en la CRT.

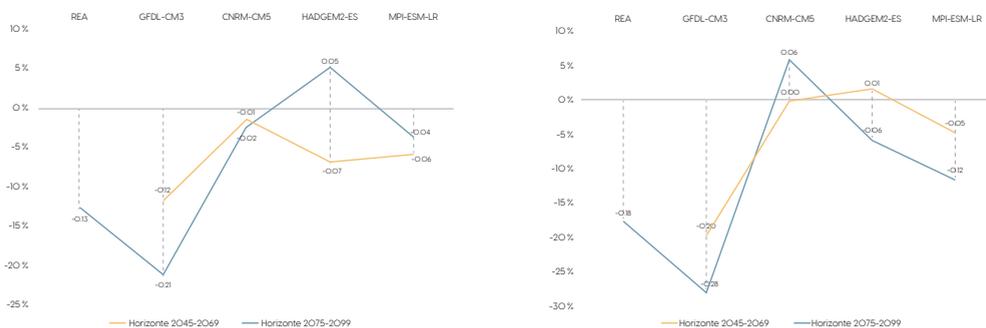
Se concluye que, si bien hay suficiente agua, este volumen es anual y no permite conocer si se tiene disponibilidad en todos los meses. Un análisis mensual de la disponibilidad anual permitirá identificar con mayor alcance la disponibilidad del recurso hídrico e identificar los meses con déficit de agua, por tanto, lo más representativo es el análisis del comportamiento de los volúmenes de manera mensual.

Escenarios de cambio en la precipitación

Los escenarios de cambio climático en la precipitación obtenidos del Atlas Climático de la UNIATMOS del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM y el INECC, muestran una clara disminución en la precipitación anual en el territorio de la CRT. Para el RCP 4.5, la anomalía en la precipitación anual proyectada oscila desde un -1.1 % hasta un -14.0 %, según el modelo de circulación atmosférica y el horizonte proyectado. Para el horizonte futuro medio 2045-2069 el modelo CNRM-CM5 proyecta una anomalía negativa de -0.01, es decir, una reducción en la precipitación anual de 1.1 %. Por su parte el horizonte 2075-2099 observa una mayor variabilidad en la anomalía, para modelo HADGEM2-ES muestra una anomalía positiva de 0.05, mientras que el modelo GFDL-CM3 observa la mayor anomalía negativa, -0.21 (Figura 2a). Para el RCP 8.5 la anomalía en la precipitación anual proyectada oscila entre 0.06 hasta un -0.28. Para los dos horizontes de tiempo el modelo CNRM-CM5 es el más optimista, e inclusive proyecta aumento en la precipitación anual, con una anomalía positiva de 0.06 para el horizonte lejano 2075-2099, y sin cambios, para el horizonte cercano 2045-2069 y el horizonte lejano respectivamente (Figura 2b).

Figura 2

Tasa de cambio proyectada en la precipitación anual en la CRT, según horizonte y modelo de circulación atmosférica



Fuente: elaboración propia, a partir de los resultados de la estimación de disponibilidad de agua en la CRT.

Balance hídrico proyectado bajo escenarios de cambio climático

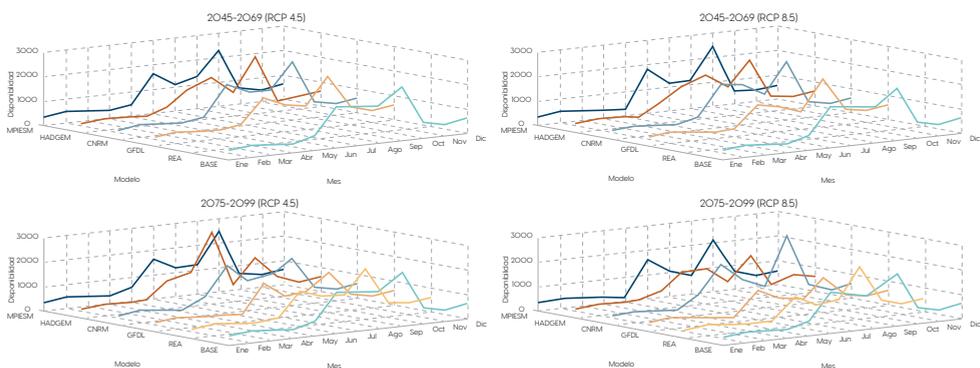
Después de haber estimado el balance hídrico actual y conocer los escenarios de cambio en la precipitación para la CRT, se calculó el impacto de la relación lluvia-escurrimiento para cada uno de los escenarios de cambio en la precipitación considerados en este trabajo. Las precipitaciones impactadas se sustituyeron en plantillas de cálculo elaboradas en Excel para la aplicación del método del SCS-CN y así obtener los escurrimientos asociados a dichas precipitaciones impactadas por el cambio climático.

La Figura 3, muestra los regímenes de disponibilidad de agua para la CRT, para los dos escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, dos horizontes de tiempo 2045-2069 y 2075-2099 analizados y para los cuatro modelos de circulación atmosférica y el REA. Se observan mínimas diferencias en el comportamiento de la disponibilidad de agua entre el escenario base (línea anaranjada) y los escenarios de cambio climático.

De manera general, se observa mínima disminución en la disponibilidad de agua en los meses de estiaje (noviembre a mayo). Sin embargo, para los meses de avenidas, se observa un mayor impacto en la disminución de la disponibilidad de agua. El déficit de agua es mínimo hacia el horizonte 2045-2069. La variación en los déficits es mayor hacia el horizonte 2075-2099. Para todos los horizontes el modelo CNRM-CM5 es el más optimista y el modelo GFDL-CM3 es el más pesimista.

Figura 3

Disponibilidad de agua mensual, según modelo de cambio climático y horizonte para la CRT



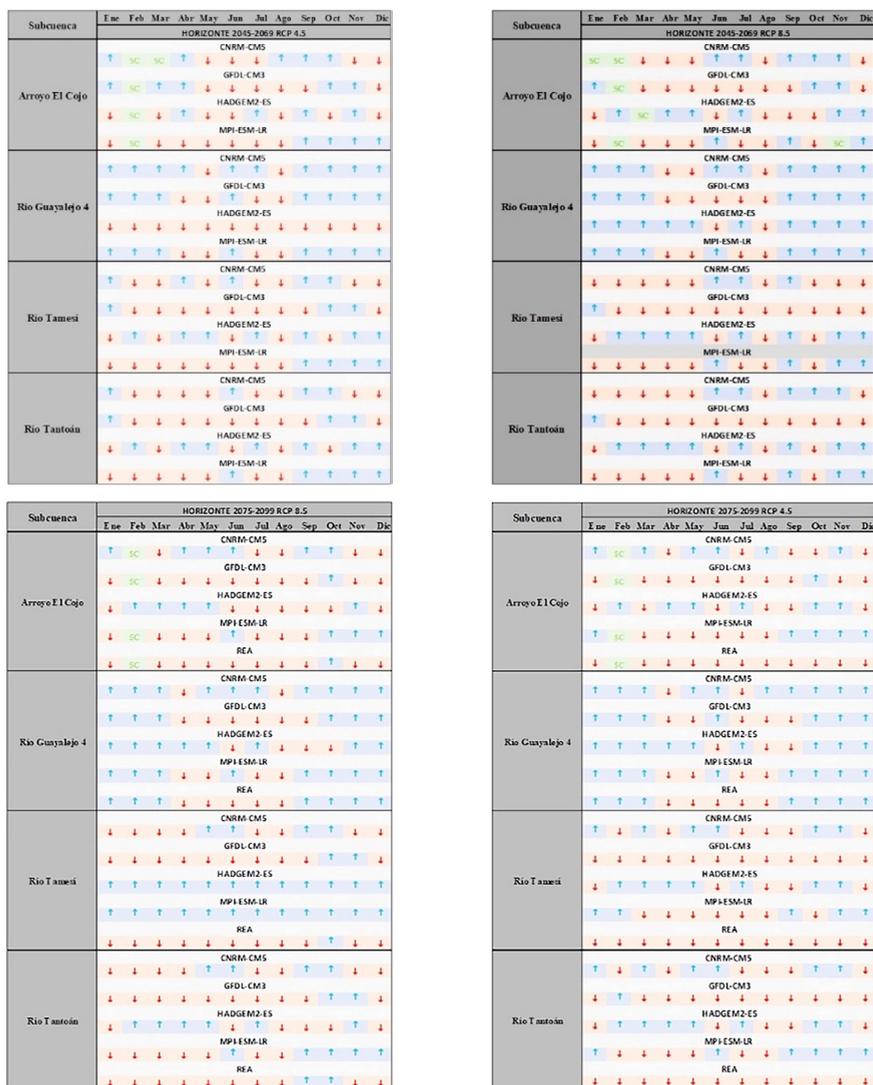
Fuente: elaboración propia, a partir de los resultados de la estimación de disponibilidad de agua en la CRT.

En lo que respecta a la disponibilidad en cada de las subcuencas que integran la CRT, se observa que las subcuencas del río Tantoán y arroyo El Cojo muestran

déficits con el mismo patrón del régimen actual de disponibilidad de agua y se extienden durante más meses, prolongando la época de estiaje.

Figura 4

Regímenes mensuales de disponibilidad de agua por subcuenca, según escenarios de cambio climático



Fuente: elaboración propia, a partir de los resultados de la estimación de disponibilidad de agua en la CRT.

Los modelos HADGEM2-ES, MPI-ESM-LR y el REA son los que mayor impacto en la disponibilidad de agua observan en estas subcuencas, tanto para el escenario RCP 4.5 y 8.5. La subcuenca del río Tamesí observa para los modelos GFDL-CM3 y REA, y para el escenario RCP 4.5 disminución en su disponibilidad de agua para todos los meses, acentuándose hacia el horizonte 2075-2099. Esta situación mejora para el escenario RCP 8.5. La subcuenca del río Guayalejo 4, también se ve impactada por el cambio climático, mayormente en los meses de avenidas, sobre todo al horizonte 2045-2069. El régimen en la disponibilidad de agua para cada una de las subcuencas y para todos y cada uno de los escenarios de cambio climático proyectados se muestra en la Figura 4.

Conclusiones

El impacto que el cambio climático puede tener sobre la disponibilidad de agua en la CRT, después de analizar los resultados obtenidos es el siguiente:

El régimen mensual de precipitación en cada una de las subcuencas se comporta de forma diferente ante el cambio en la precipitación, las diferencias entre el escenario base y de cambio climático son mínimas.

Los dos escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 analizados para los cuatro modelos de circulación atmosférica y el REA no muestran grandes diferencias en términos de los déficits de agua estimados para el horizonte 2045-2069. Se observa una mayor variación en los déficits de agua para el horizonte 2075-2099, observándose esta variación en un sentido positivo, es decir, los déficits de agua tienden a disminuir en algunas subcuencas.

El modelo CNRM-CM5 es el más optimista y el modelo GFDL-CM3 es el más pesimista para ambos horizontes de tiempo, los demás modelos tienen comportamientos similares, variando de subcuenca a subcuenca en la CRT.

La metodología desarrollada permitió estimar el balance hídrico de manera mensual, permitiendo conocer el régimen de déficit en cada subcuenca de la CRT. La metodología propuesta resuelve la deficiencia que tiene la NOM-011-CNA-2015 dado que desarrolla un análisis mensual del proceso lluvia-escurrimiento, método del SCS-CN, que permite estimar la variabilidad de este proceso entre la época de estiaje y la época de avenidas. La NOM-011-CNA-2015 expresa claramente en sus planteamientos generales que la metodología es el procedimiento mínimo que se debe aplicar para determinar la disponibilidad media anual de agua en una cuenca hidrológica que se vaya a estudiar.

Por último, la incorporación al proceso de cálculo de las anomalías en la precipitación en el método del SCS-CN fue simple, permitiendo conocer el escurrimiento directo impactado por el cambio climático para cada una de las

subcuencas, el cuál posteriormente se incorporó a los cálculos del balance hídrico impactado también por el cambio climático, obteniendo los volúmenes mensuales de déficits de agua en las cuatro subcuencas tramos de la CRT. La metodología propuesta y su aplicación al estudio de caso de la CRT se pueden replicar sin mayores problemas a otras cuencas hidrológicas en México.

Referencias

- Chow, V., Maidment, D. y Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Publishing Company. New York, NY. ISBN 0-07-010810-2.
- Conagua. (2015). *Estadísticas del Agua en México Edición 2015*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua. México, D.F.
- Francisco-Nicolás, N., Turrent-Fernández, A., Flores-López, H., Martínez-Menes, M. y Enríquez-Quiroz, J. (2010). Estimación del escurrimiento superficial con el método SCS-CN en el trópico subhúmedo de México. *Terra Latinoamericana*, 28(1), 71-78. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018757792010000100008&lng=es&tlng=es.
- Hawkins, R., Ward, T., Woodward, D. y Van Mullem, J. (Eds). (2009). *Curve Number Hydrology. State of the Practice*. Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers. Reston, VA 20191-4400. ISBN 978-0-7844- 1004-2.
- Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P. y Jarvis, A. (2005). Very high- resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25, 1965-1978. DOI: 10.1002/joc.1276.
- Martínez-Austria, P., y Patiño-Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(1), 5-20. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000100001&lng=es&tlng=es.
- SCS. (1972). *Engineering handbook. Section 4. Hydrology*. U. S. Department of Agriculture. Soil Conservation Service National. Washington, DC, USA.
- Semarnat. (2015). *Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2015. Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Diario Oficial de la Federación, 27 de marzo de 2015. México, D.F.
- _____. (2016). *ACUERDO por el que se da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas Arroyo Zarco, río Ñadó, río Galindo, ...* Comisión Nacional del Agua (Conagua). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). Diario Oficial de la Federación, 27 de mayo de 2015. México, D.F. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5439123&fecha=27/05/2016

UNIATMOS-INECC. (2020). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Base de Datos*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático – Centro de Ciencias de la Atmósfera Universidad Autónoma Nacional de México. http://atlasclimatico.unam.mx/AECC_descargas/

Sonda multiparamétrica para medir la calidad del agua

Alfonso Betancourt Núñez¹

Alejandro Humberto García Ruiz²

Mayra Guadalupe Treviño Berrones³

Resumen

En este trabajo se desarrolló una sonda multiparamétrica para la medición de parámetros tales como turbidez, temperatura, conductividad y salinidad, esto para determinar la calidad del agua. En el diseño de la sonda multiparamétrica se utilizaron sensores con las características óptimas, así como una tarjeta Arduino-Mega, lo que permitió la obtención de una sonda de bajo costo en comparación con las que se encuentran en el mercado. La validación del funcionamiento de la sonda se realizó utilizando un equipo especializado modelo *Idronaut Ocean Seven 310* CTD. Los resultados indican que no existe una diferencia significativa entre los datos obtenidos, por lo tanto, se concluye que la sonda multiparamétrica desarrollada, cumple con los requisitos para su aprobación por ello se concluye que el supuesto planteado para este trabajo de investigación es aceptado.

Palabras clave: sonda multiparamétrica, calidad, agua.

Introducción

La salinidad, la temperatura, el pH, turbidez, entre otros, son parámetros que influyen en la densidad del agua de los mares, océanos, ríos, lagunas, etcétera. Además de que afectan a varios procesos físicos y propiedades importantes del agua tales como: viscosidad, tensión superficial, presión osmótica, punto de fusión, punto de ebullición y solubilidad de gases. De aquí que sean estos parámetros importantes en el estudio de la calidad de las aguas. En el mercado existen varios equipos que permiten la medición de estos parámetros, pero sus precios son bastante elevados ya que oscilan entre 20 mil y 30 mil dólares. Por esta razón, el presente trabajo propone el desarrollo de una sonda multiparamétrica para la medición de la salinidad a partir de la conductividad y temperatura del agua, así como, también de la turbidez

¹ Estudiante de Maestría de la División de Posgrado, FI-UAT

^{2 3} Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller”, Universidad Autónoma de Tamaulipas. México

de esta. El costo del desarrollo de la sonda multiparamétrica será mucho menor que el costo de los equipos similares que se ofertan en el mercado, pero manteniendo las mismas características que estos.

La salinidad es una propiedad importante de los cuerpos de agua dulce y aguas oceánicas. Originalmente este parámetro se concibió como una medida de la cantidad total de sales disueltas en un volumen determinado de agua. Dado que la determinación del contenido total de sales requiere de análisis químicos que consumen mucho tiempo, decidimos utilizar métodos indirectos para estimar la salinidad (APHA-Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1992). Dicha salinidad de un cuerpo de agua se puede determinar mediante la medición de: la conductividad, la densidad, el índice de refracción o velocidad del sonido en agua, utilizando en esta ocasión la conductividad.

Tabla 1

Composición de los iones para cuerpos de agua salada y dulce

| Iones | Agua dulce (mg/L) | Agua salada (mg/L) |
|------------------|----------------------|-----------------------|
| Aniones | | |
| CO ₃ | 58.4 | 140 |
| SO ₄ | 12.2 | 271 |
| CL- | 7.8 | 19440 |
| Total | 77.4 | 22290 |
| Cationes | | |
| Ca ⁺⁺ | 15 | 410 |
| Mg ⁺⁺ | 4.1 | 1300 |
| Na+ | 6.3 | 10810 |
| K ⁺ | 2.3 | 390 |
| Total | 27.7 | 12910 |

Fuente: Webber y Thurman (1991).

La Tabla 1 presenta la abundancia relativa de los iones más comunes en cuerpos de agua dulce y en aguas oceánicas. Los iones y los elementos presentes en cuerpos de agua naturales se originan de procesos de mineralización y desgaste de las rocas que forman la corteza terrestre y de emanaciones del manto terrestre, a través de

la actividad volcánica. El agua de mar está compuesta en promedio de un 96.52% de agua y un 3.49% de sustancias disueltas (mayormente sales). La abundancia relativa de los iones es constante en aguas oceánicas bien mezcladas.

La turbiedad en el agua es causada por materia suspendida y coloidal como arcilla, sedimento, materia orgánica e inorgánica dividida finamente, plancton y otros microorganismos microscópicos. La turbiedad es una expresión de la propiedad óptica que causa la luz al ser dispersada y absorbida en vez de transmitida sin cambios en la dirección del nivel de flujo a través de la muestra: en otras palabras, es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea reemitida y no transmitida a través de la suspensión. A mayor intensidad de dispersión de la luz, la turbidez será mayor. La correlación de la turbiedad con el peso o concentración del número de partículas de material suspendido es difícil debido a que el tamaño, forma e índice de refracción de las partículas afecta las propiedades de dispersión de la luz de la suspensión. La determinación de turbiedad es de gran importancia en aguas para consumo humano y en un gran número de industrias procesadoras de alimentos y bebidas. Los valores de turbiedad sirven para establecer el grado de tratamiento requerido por una fuente de agua cruda, su filtrabilidad y consecuentemente, la tasa de filtración más adecuada, la efectividad de procesos de coagulación, sedimentación y filtración, así como para determinar la potabilidad del agua.

Definición del problema

La salinidad del agua es un problema que no solo está presente en los mares sino también en ríos y mantos acuíferos. El agua con una alta concentración de sales es muy dañina tanto para el consumo humano como para el uso en maquinaria y riego. Por ejemplo, si se utiliza una bomba de agua convencional para bombear agua salada, esta comenzará a corroerse y quedará inservible en un menor tiempo del planteado. Además, si esa misma agua se utiliza para lavar motores, maquinaria o vehículos, entre otros, estos también comenzarán a tener corrosión y se dañarán debido a su exposición. Para la medición de la salinidad es necesario medir la conductividad del agua, así como su temperatura. Por otra parte, la turbidez es un parámetro muy importante de la calidad de agua ya que este permite definir qué tipo de tratamiento es necesario al momento de convertirla en agua potable.

En el mercado se venden varios tipos y modelos de equipos para medir la conductividad, salinidad y turbidez del agua, ya sea, como equipos para la medición de cada variable por separado o en forma de sonda multiparamétrica que mide todas esas variables. Sin embargo, los precios de estas últimas son muy elevados, oscilando entre 15 mil y 35 mil dólares.

El desarrollo de la electrónica ha llegado a tal nivel que en el mercado se pueden encontrar sensores y tarjetas de procesamiento de muy buena calidad y confiabilidad que permiten implementar sistemas de medición de bajo costo. Por tal motivo se desarrolló una sonda multiparamétrica que permite medir la conductividad, temperatura, salinidad y turbidez del agua con componentes de bajo costo y que pueda ser utilizada para la medición de la calidad del agua ya sea de forma manual o instalada *in situ*.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar una sonda multiparamétrica para realizar mediciones y analizar la calidad del agua con la ayuda de Arduino.

Objetivos específicos

- Analizar los sensores a utilizar para la sonda multiparamétrica.
- Diseñar el sistema electrónico para la celda de medición y la sonda multiparamétrica. Desarrollar el *software* para la adquisición de datos con la sonda multiparamétrica.
- Validar el funcionamiento de la sonda multiparamétrica

Justificación

Como resultado de este trabajo de investigación, se contará con un equipo para medir los parámetros de salinidad, temperatura y turbidez; podrá ser utilizado en el estudio de la calidad del agua, aspecto de interés para los habitantes de la zona conurbada que se abastecen de los ríos que desembocan en el Golfo de México. Lo anterior es de vital importancia porque en tiempos de estiaje los ríos se ven afectados y contaminados con agua salada. Además, dicha sonda multiparamétrica podrá ser utilizada para el monitoreo en los diferentes cuerpos de agua que estén dentro de la zona norte de Veracruz y sur de Tamaulipas.

Por lo tanto, si contamos con mediciones de la calidad del agua en tiempo real, será mucho más fácil detectar si el cuerpo de agua se comienza a ver afectado por agua salada y así prevenir que dicha agua contaminada llegue hasta el cárcamo donde se encuentra localizadas las bombas de agua de cada uno de los municipios.

Delimitación

La validación del funcionamiento de la sonda multiparamétrica se realizará a nivel de laboratorio utilizando el método de comparación con un equipo Hydrolab, muestras preparadas y muestras de agua traídas de diferentes cuerpos de agua de la zona.

Metodología

Para todo desarrollo de sistemas tanto *hardware* como *software* es de suma importancia el seguimiento de especificaciones que le permitirá a los desarrolladores el tener una disciplina que hará que todas las etapas del desarrollo del sistema sean coherentes y, además, que sea lo más formal posible.

En la parte del desarrollo de *software* que este proyecto propone, al ser una herramienta que pretende tener una aplicación dentro del contexto de un problema real, tiene que seguir un proceso de análisis y diseño que nos proporcionará los cimientos básicos con los cuales se desarrollará la aplicación conjuntamente.

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se siguen los pasos de la metodología descrita a continuación:

Análisis: en el proceso de análisis y la obtención de requerimientos se trabaja con el encargado de agua potable de la zona conurbada para determinar cuáles son los parámetros necesarios para el desarrollo del sistema.

Diseño: se diseña el sistema electrónico para gestión de los dispositivos con los que cuenta la sonda multiparamétrica.

Desarrollo: esta fase está seccionada en dos partes. El desarrollo del *software*, la programación del sistema electrónico para la adquisición de datos con la sonda multiparamétrica y el almacenamiento de estos; dicha programación se realizará en el IDE Arduino en su propio lenguaje que lleva el mismo nombre. Para la segunda parte se realiza el desarrollo, ensamblaje y conexión de los sensores y el módulo de almacenamiento a la placa Arduino previamente mencionada.

Validación: se prueba la funcionalidad sobre el sistema electrónico con la finalidad de determinar si este tiene la capacidad de adquirir datos de manera eficiente y almacenarlos en archivos para su posterior procesamiento.

Población

La cantidad de pruebas de funcionalidad realizadas para la validación de la sonda multiparamétrica y así poder dar una resolución al supuesto de este trabajo de investigación fue de 1 muestra de agua para realizar 50 lecturas.

Técnicas de recolección de datos

Como método de recolección de datos, por falta de instrumentación para sacar los muestreos de las aguas para calibrar nuestra sonda, se toma información de las asociaciones como Conagua o CIDIPORT, que cuentan con instrumentación e información que pueden compartir. Como dichos datos ya están validados, este método verifica el funcionamiento de dicha sonda y comprobar su funcionamiento.

Para la recolección de datos para la validación de la sonda se emplea un equipo Idronaut Ocean Seven 310 CTD de CIDIPORT que es un equipo de medición especializado en la calidad de agua y que mide las mismas variables que la sonda desarrollada. Con dicho equipo, se miden muestras de agua y los datos arrojados son almacenados para validar el funcionamiento y calibración de nuestro prototipo midiendo las mismas muestras. Se llevó a cabo un registro de la información del funcionamiento de la sonda multiparamétrica en archivos CSV para así mantener la información en orden y accesible.

Desarrollo de la sonda multiparamétrica

Análisis de los sensores para la sonda

En este trabajo de investigación se emplea la tecnología Arduino, así como, dispositivos compatibles con esta para el desarrollo de la sonda multiparamétrica. El proceso de desarrollo de la sonda multiparamétrica comenzó con el análisis de sensores compatibles con esta tecnología, orientados a medir a los parámetros con los que la sonda se encontrará en contacto, siendo estos: salinidad, temperatura y turbidez. Lo anterior con la finalidad de seleccionar a los sensores que mejor se ajusten a las limitaciones y requerimientos de este trabajo de investigación.

Sensor de salinidad

La salinidad, según Geo Enciclopedia (2016), es una característica que determina la densidad del agua de los océanos. Dicha densidad aumenta mientras más fría y más sal tenga y se ve afectada por las precipitaciones. Es posible medir salinidad del agua a través de una gran variedad de tipos de sensores como lo son: conductivos, ultrasónicos, interferómetros radiométricos con satélites, y sensores CTD. Sin embargo, los sensores más populares y ampliamente utilizados son los sensores conductivos. En este sentido este trabajo de investigación se centrará en analizar este tipo de sensor. Los sensores de conductividad se organizan en tres grupos: inductivos, capacitivos y celdas de cuatro electrodos. En la Tabla 2 se presentan las ventajas y desventajas de cada uno de estos grupos de sensores.

Tomando en cuenta las ventajas y desventajas de cada tipo de sensor, se diseñó un sensor de celdas de cuatro electrodos para el desarrollo de la sonda multiparamétrica, debido principalmente al bajo consumo energético que requiere para su operatividad, así como, a la posibilidad de fabricar el sensor localmente a través del uso de celdas de carbono, reduciendo costos de producción y operación. El sistema de 4 electrodos (potenciométrico) está basado en el principio de inducción, lo que elimina los problemas comunes asociados al amperimétrico (Collazos, 2012). A los dos electrodos externos va aplicada una corriente alterna,

mientras que en los dos internos se mide la diferencia de potencial inducida por el flujo de corriente, que depende de la conductividad de la solución donde se ha sumergido la sonda. En este dispositivo sólo las variaciones en la geometría interna del dispositivo pueden afectar la constante. Estos sensores tienen un rango de $1\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta $1400\text{ mS}/\text{cm}$.

Tabla 2

Ventajas y desventajas de los sensores de conductividad

| Sensor | Ventajas | Desventajas |
|-----------------------------|--|--|
| Inductivos | <ul style="list-style-type: none"> • No se ve afectado por la humedad • No se ve afectado por la suciedad • No depende de mantenimiento • No lo afectan los colores • No tiene zonas ciegas | <ul style="list-style-type: none"> • Rango de operación corto • Puede ser afectado por campos electromagnéticos |
| Capacitivos | <ul style="list-style-type: none"> • Detecta a través de objetos metálicos y no metálicos • Son de estado sólido y tienen larga vida útil • Disponen de muchas configuraciones | <ul style="list-style-type: none"> • Distancia de detección corta • Son muy sensibles a factores ambientales • No son selectivos con respecto al objeto |
| Celdas de cuatro electrodos | <ul style="list-style-type: none"> • Mide concentraciones bajas • Muy bajo consumo eléctrico • Posibilidad de desarrollarlo uno mismo | <ul style="list-style-type: none"> • Ubicación crítica para su correcto funcionamiento |

Fuente: elaboración propia.

Sensor de temperatura

La temperatura es otro de los parámetros analizados por la sonda multiparamétrica. Al igual que para el sensor de salinidad, fue necesario llevar a revisar la literatura, así como, en otras fuentes, para determinar cuál sensor brinda mejores resultados para los fines de este trabajo de investigación. El resultado del análisis efectuado se presenta en la Tabla 3, con las ventajas y desventajas de los principales sensores de temperatura utilizados en la literatura.

Tabla 3*Ventajas y desventajas de los sensores de temperatura*

| Sensor | Ventajas | Desventajas |
|---------|--|--|
| DHT11 | <ul style="list-style-type: none"> • Cuenta con una alta estabilidad y fiabilidad en uso tanto a largo como a corto plazo • Envía una señal digital calibrada | <ul style="list-style-type: none"> • Solo lee números enteros, además, de que es un sensor de circuito expuesto |
| DHT22 | <ul style="list-style-type: none"> • Alta fiabilidad y estabilidad • Añade la opción de leer la temperatura en decimales | <ul style="list-style-type: none"> • El circuito está expuesto a la humedad |
| TMP36 | <ul style="list-style-type: none"> • Preciso y de bajo voltaje • La salida de voltaje que proporciona es linealmente proporcional a la temperatura en grados Celsius • No requiere ninguna calibración externa | <ul style="list-style-type: none"> • No soporta la humedad |
| DS18B20 | <ul style="list-style-type: none"> • Solo requiere una línea de datos y GND para comunicarse con la placa de control • La resolución de medición de la temperatura se puede establecer en 9, 10, 11 o 12 bits, lo que corresponde a incrementos de 0.5 °C, 0.25 °C, 0.125 °C y 0.0625 °C • Cuenta con una versión impermeable | <ul style="list-style-type: none"> • Solo se puede tener conectado un sensor DS18B20 por placa de control |

Fuente: elaboración propia.

Derivado de los resultados del análisis, se decidió hacer uso del sensor DS18B20 para medir la temperatura por parte de la sonda multiparamétrica propuesta en este trabajo. Dentro de las opciones económicas existentes en el mercado, este sensor cuenta con una versión impermeable, lo que es de especial interés por el estrecho contacto con el agua con la que operará la sonda multiparamétrica.

Sensor de turbidez

Un sensor de turbidez proporciona datos relacionados con la cantidad de sólidos contaminantes presentes en el agua. Estos sensores miden los niveles de calidad al registrar los niveles de turbidez. Utilizan luz para detectar las diferentes partículas suspendidas en el agua al medir las tasas de dispersión y transmitancia, las cuales cambian con las diferentes cantidades totales de sólidos suspendidos (TSS) en el agua (Endress + Hauser México, s. f.).

Para este sensor no se encontró una versión económica y compatible con la tecnología Arduino, que se pudiera utilizar para integrarse en el desarrollo de la sonda. Se optó por analizar el comportamiento del sensor y diseñar una versión propia que permitiera reproducir su funcionalidad.

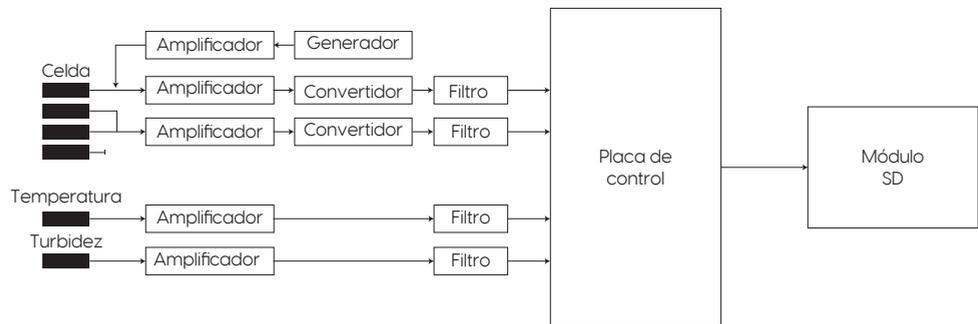
Diseño de la sonda multiparamétrica

A) Esquema general de la sonda

En la Figura 1 se presenta al esquema de bloques que define la funcionalidad de la sonda multiparamétrica.

Figura 1

Esquema de bloques de la sonda multiparamétrica



Fuente: elaboración propia.

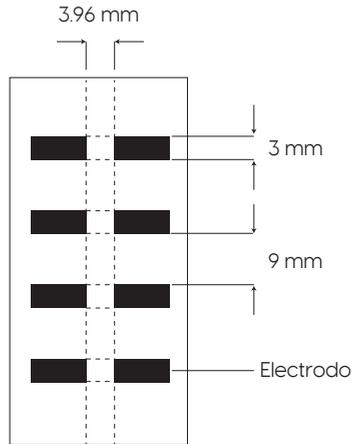
En la Figura 1 se observan los tres sensores utilizados por la sonda multiparamétrica para medir los parámetros del agua: salinidad, temperatura y turbidez. Cada uno de los sensores se conecta de manera independiente a circuitos electrónicos destinados a que las señales asociadas a las medidas de los sensores sean amplificadas y filtradas para mejorar la precisión de los datos medidos. Posteriormente, la señal mejorada es enviada a la placa de control para su procesamiento e interpretación. Finalmente, a través de un módulo de tarjetas SD los datos son guardados para su almacenamiento y posterior análisis por parte de expertos.

Diseño del sensor de salinidad

El sensor de salinidad se diseñó localmente basándose en sensores de celdas de cuatro electrodos. Para el diseño del sensor se emplearon celdas de carbón cuadrado de 1 mm de lado por 3 mm de espesor, colocados de forma paralela a una distancia de 9 mm entre cada una de las celdas (Figura 2).

Figura 2

Esquema de la celda



Fuente: elaboración propia.

Una vez establecido y armado el diseño del sensor de salinidad se recubrió a las celdas de carbono con resina epóxica para protegerlas y asegurar que la estructura del sensor no se viera alterada por factores externos. Después de recubrir el sensor con la resina se le realizó una perforación de 3.6 mm justo al centro para permitir que los electrodos hicieran contacto con el agua. En la Figura 3 se presenta el sensor de salinidad construido.

Figura 3

Sensor de salinidad construido

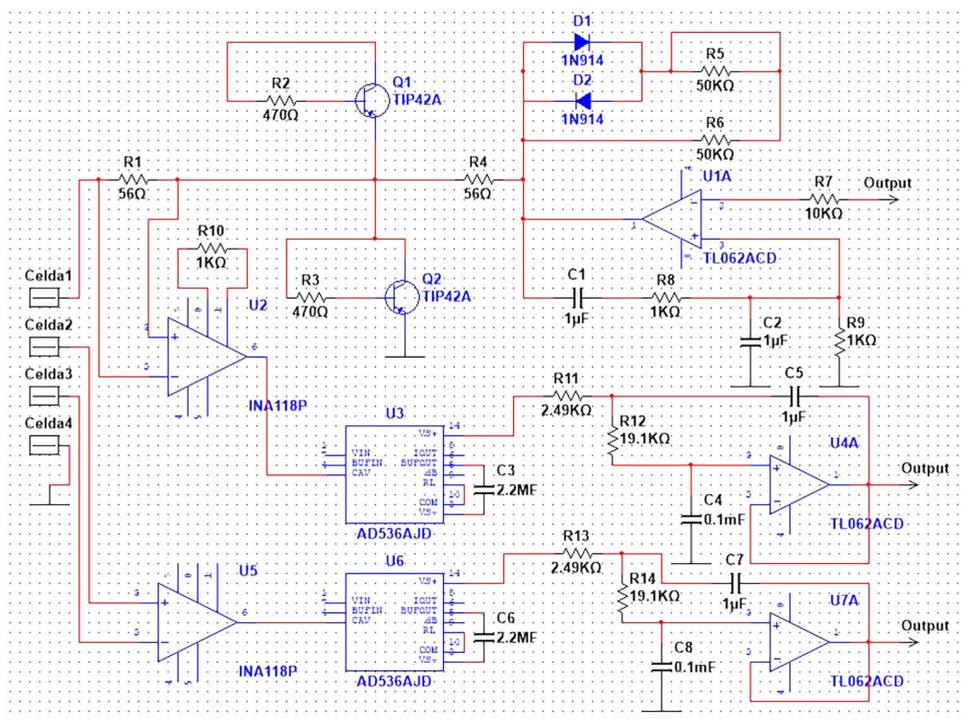


Fuente: elaboración propia.

El diseño de los circuitos electrónicos utilizados para mejorar y filtrar las mediciones del sensor de salinidad es mostrado en la Figura 4. El diseño de todos los circuitos utilizados en este trabajo empleó el *software* MultiSim de National Instruments. A través de este *software* es posible probar la funcionalidad de los circuitos y realizar los ajustes pertinentes en caso de ser necesario, antes de proceder con la implementación física de estos.

Figura 4

Módulo para medir conductividad



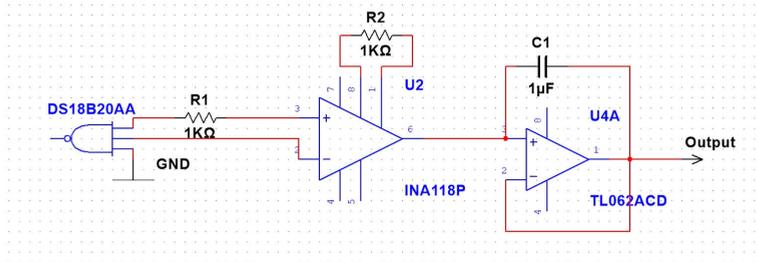
Fuente: elaboración propia.

Diseño del sensor de temperatura

Aunque para la sonda multiparamétrica se adquirió el sensor de temperatura DS18B20A, se integró a la salida de este, al igual que en los otros sensores, un amplificador y un filtro para mejorar la calidad de las mediciones, que se vuelven más precisas y se logra disminuir considerablemente el porcentaje de error. La Figura 5 presenta al circuito electrónico diseñado en MultiSim para incorporarse al sensor de temperatura.

Figura 5

Módulo para medir temperatura



Fuente: elaboración propia.

En la Figura 6 podemos observar el sensor de temperatura adquirido.

Figura 6

Sensor de temperatura DS18B20A



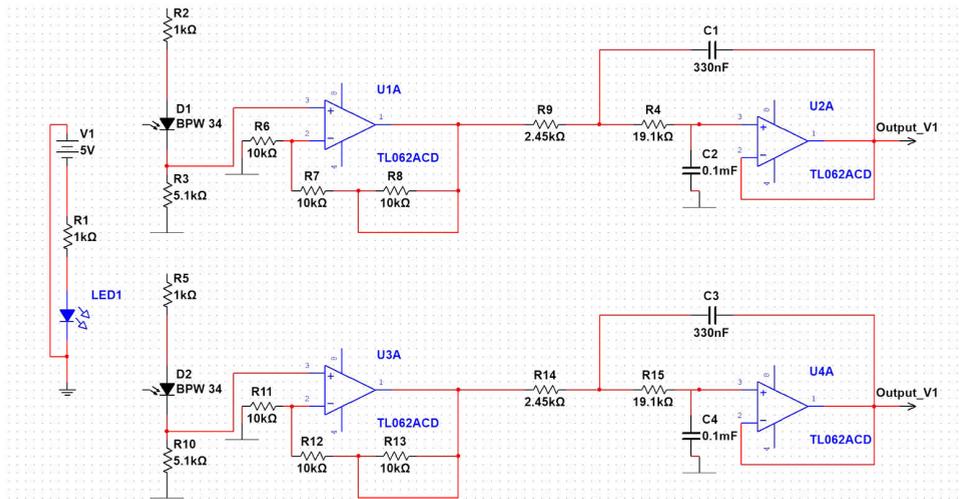
Fuente: elaboración propia.

Diseño del sensor de turbidez

Para el diseño del sensor de turbidez se comenzó estudiando la funcionalidad de sensores existentes en el mercado. Una vez que se identificó la manera en que estos sensores realizan la medición de turbidez en el agua, se diseñó un circuito electrónico que permitiera replicar la funcionalidad a una menor escala y en el que el costo de producción fuera más accesible. De esta manera, se logró el diseño de un sensor de turbidez de bajo costo que, con el apoyo de un amplificador y un filtro, produjo resultados eficientes en la identificación de contaminantes sólidos en el agua. En la figura 7 se muestra el diseño del circuito electrónico realizado en MultiSim para el sensor de turbidez.

Figura 7

Módulo para medir turbidez



Fuente: elaboración propia.

Figura 8

Sensor de turbidez desarrollado



Fuente: elaboración propia.

Programación de la lógica de la sonda

En este apartado se describe el proceso de programación de la lógica de la sonda multiparamétrica, desde las librerías utilizadas hasta el guardado de los datos recopilados por los sensores en una memoria SD para su almacenamiento y posterior

análisis. Dado que la sonda fue desarrollada con tecnología Arduino, se empleó al entorno de desarrollo integrado (IDE) del mismo nombre, para su programación, siendo este software el IDE oficial para programar en esta tecnología.

Librerías

Debido a la especialización de algunos de los módulos utilizados durante la programación de la sonda se requirió el uso de librerías que permitieran incorporar a las funcionalidades deseadas al programa. En la Tabla 4 se presentan las librerías utilizadas en este trabajo de investigación.

Tabla 4

Librerías implementadas

| Nombre de la librería | Descripción |
|-----------------------|--|
| OneWire | Permite la transmisión y recepción de datos a través de un único puerto (Martínez, 2020) |
| DallasTemperature | Habilita el control de una gran variedad de sensores de temperatura (DallasTemperature-Arduino Reference, s. f.) |
| SD | Tiene como función principal habilitar la lectura y escritura de archivos en tarjetas SD (Greiman, 2019) |
| RTClib | Permite trabajar con relojes de tiempo real (RTC) (Adafruit, s. f.) |

Fuente: elaboración propia.

Figura 9

Declaración de constantes y variables

```

/*Constantes que utilizaremos para establecer los pines de conexión de cada sensor*/
const int PT100DQ = 9;
const int SDPin = 10;
const int VmPin = A1;
const int VPin = A2;
const int Vt1Pin = A3;
const int Vt2Pin = A4;

/*Variables que utilizaremos para calcular la Salinidad*/
float R1 = 0.0; //Resistencia R* [Predeterminado]
float Vm = 0.0; //Voltaje Medido [Lectura]
float Volt = 0.0; //Voltaje [Lectura]
float Temp = 0.0; //Temperatura [Lectura] Sensor PT100
float k = 0.0; //Constante de la celda
//Variables para realizar operaciones
float I, R, S, Turb; //Utilizarse para realizar las formulas
//I = Intensidad - R = Resistencia - S = Salinidad - Turb = Turbidez
/* Para medir la Turbidez*/
float Vt1, Vt2;

/*Para Sensor RTC*/
RTC_DS3231 rtc; //Sensor RTC (Time)
DateTime now;

```

Fuente: elaboración propia.

Declaración de constantes y variables

Después de incorporar a las librerías en el programa, se declararon las constantes y variables necesarias para definir los puertos con los que se conectarán los distintos módulos, así como, para establecer los parámetros para la configuración de estos. En la Figura 9 se presenta el código utilizado para la declaración de constantes y variables.

Inicialización del programa

La inicialización del programa de la sonda multiparamétrica se efectúa a través del método SETUP, siendo este ejecutado una única vez al energizar la sonda. En este se realiza la inicialización y ejecución de cuatro acciones:

Inicialización del módulo UART: Para habilitar la comunicación serial de la placa de control.

Inicialización del módulo RTC: Pone en marcha el funcionamiento del reloj de tiempo real para conocer la hora y fecha exacta en que se realiza la operación de la sonda.

Inicialización del módulo SD: Habilita la escritura de archivos en la tarjeta SD.

Guardado en la tarjeta SD: Realiza una primera escritura del estado de los sensores para validar que el sistema funcione con normalidad. La ejecución de cada proceso en este método se realiza de manera independiente, dejando un tiempo de espera de un segundo entre procedimiento para evitar que se traslapan unos con otros. El código de este método se puede observar en la Figura 10.

Figura 10

Setup

```
void setup () {  
  Serial.begin(9600);  
  delay (1000);  
  InicializadorRTC ();  
  delay (1000);  
  InicializadorSD ();  
  delay (1000);  
  GuardarSD ();  
  delay (1000);  
}
```

Fuente: elaboración propia.

Inicialización del módulo RTC

Este método se valida para comprobar que el módulo RTC se encuentre conectado correctamente. Después, si se detecta que se ha perdido la fuente de alimentación del reloj, se establece la fecha y hora con base en los datos de compilación del programa. La Figura 11 presenta el código correspondiente a este método.

Figura 11

Inicializador del reloj

```
void InicializadorRTC () {  
  if (! rtc.begin()) {  
    Serial.println(F ("Sensor RTC no encontrado"));  
    while (1);  
  }  
  if(rtc.lostPower()) {  
    //Se toma la fecha y hora de compilación para fijarla  
    rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));  
  }  
}
```

Fuente: elaboración propia.

Inicialización del módulo SD

El objetivo de este método es el de inicializar al módulo SD y en caso de identificar algún error de conexión o comunicación con la placa de desarrollo, notificarlo al usuario (Figura 12).

Figura 12

Inicializador SD

```
void InicializadorSD () {  
  Serial.print(F ("Iniciando SD ..."));  
  if (! SD.begin(SDPin)){  
    Serial.println(F ("Error al iniciar"));  
    return;  
  }  
}
```

Fuente: elaboración propia.

Guardado en la tarjeta SD

Este método es empleado para escribir los datos recuperados por los sensores en un archivo que posteriormente pueda ser analizado en una computadora. Cada registro guardado además del estado de todos los sensores almacena la fecha y hora exacta en que se realizó la medición, esto con la finalidad de tener un registro más eficiente y que permita analizar a detalle los datos obtenidos por la sonda multiparamétrica. Durante el proceso de escritura de cada registro se efectúa una validación para comprobar que pueda escribirse datos en el archivo, en caso de obtenerse algún error durante el proceso de guardado se le notificará al usuario a través de un mensaje. El código correspondiente al método de guardado en la tarjeta SD es presentado en la Figura 13.

Figura 13

Método para almacenar los datos en la memoria SD

```
void GuardarSD() {
  File dataFile = SD.open("DATOS.csv", FILE_WRITE);
  now = rtc.now(); //Recuperando la fecha y hora actual
  if(dataFile) {
    dataFile.print(now.day(), DEC);
    dataFile.print("/");
    dataFile.print(now.month(), DEC); //Obtiene el valor de mes
    dataFile.print("/");
    dataFile.print(now.year(), DEC); //Obtiene el valor de año
    dataFile.print(",");
    dataFile.print(now.hour(), DEC); //Obtiene el valor de hora
    dataFile.print(":");
    dataFile.print(now.minute(), DEC); //Obtiene el valor de minuto
    dataFile.print(":");
    dataFile.print(now.second(), DEC); //Obtiene el valor de segundo
    dataFile.print(','); //caracter para nueva columna
    dataFile.print(I); //INTENSIDAD
    dataFile.print(','); //caracter para nueva columna
    dataFile.print(Volt); // VOLTAJE
    dataFile.print(','); //caracter para nueva columna
    dataFile.print(Temp); // TEMPERATURA
    dataFile.print(','); //caracter para nueva columna
    dataFile.print(S); //SALINIDAD
    dataFile.print(','); //caracter para nueva columna
    dataFile.print(Turb); //TURBIDEZ
    dataFile.close();
    Serial.println("Guardado SD");
  }else{
    Serial.println('Error al guardar SD');
  }
}
```

Fuente: elaboración propia.

Método principal del programa

Este es el método principal del programa. Su principal función es la adquisición de datos de los sensores y guardado de estos en una memoria SD (Figura 14).

Figura 14

Método loop para recolectar datos y realizar cálculos

```
void loop (){
  now = rtc.now(); //Obtiene la fecha actual
  Vm = analogRead(VmPin);
  Volt = analogRead(VPin);
  Temp = analogRead(PT100DQ);
  Vt1 = analogRead(Vt1Pin);
  Vt2 = analogRead(Vt2Pin);
  I = Vm / R1; //Intencidad
  R = Volt * I; //Resistencia
  S = (1 / R) * k;
  Turb = (Vt1 - Vt2)/1;

  GuardarSD();
}
```

Fuente: elaboración propia.

El método comienza con la adquisición de datos de cada uno de los sensores, después calcula parámetros necesarios para obtener el valor de salinidad, así como, de la turbidez del agua. Con los valores de salinidad, turbidez y temperatura obtenidos, se guardan datos en la memoria SD. Este procedimiento se repite de manera indefinida mientras que la placa de control se encuentre energizada. Además, para tratar de que la funcionalidad de la sonda se encuentre lo más cercana al tiempo real, no se cuenta con tiempos de retraso adicionales a los necesarios por la placa para reiniciar la ejecución del programa.

Validación del funcionamiento de la sonda multiparamétrica

Para la validación de la sonda multiparamétrica, se utilizó la sonda comercial Idronaut Ocean Seven 310 CTD (Figura 15). Esta sonda tiene entre sus principales características a las siguientes (Idronaut S.r.l, 2022): Medición de conductividad máxima: $90 \text{ mS/cm} \pm 0.0015 \text{ mS/cm}$ Rango de temperatura de medición: $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta $+50^\circ\text{C} \pm 0.0015^\circ\text{C}$ Celda de 7 electrodos en forma de anillos de cuarzo.

Figura 15

Sonda comercial Idronaut Ocean Seven 310 CTD



Fuente: elaboración propia.

El procedimiento para validar la sonda multiparamétrica se describe a continuación:

1. Se preparó una muestra de patrones de KCL con agua destilada.
2. Se introdujeron en las muestras de agua con KCL la sonda Idronaut y la sonda desarrollada.
3. Se tomaron mediciones de temperatura, conductividad y salinidad a la vez con ambos equipos y se compararon entre ellas para determinar el error de medición que daban las lecturas del termosalinómetro con respecto a las del Idronaut.

Las mediciones de cada sonda con cada uno de los sensores, así como, el error entre las mediciones se presentan en las Tablas 5 a la 8. Cada tabla se relaciona con cada uno de los sensores y en ellas se reporta al resultado obtenido para las 50 mediciones realizadas por sensor.

Tabla 5*Resultados de las mediciones de temperatura*

| No. | IDRONAUT | Sonda multiparamétrica | Error relativo |
|-----|----------|---------------------------|----------------|
| | (°C) | (°C) | (%) |
| 1 | 34.243 | 34.252 | -0.025 |
| 2 | 34.242 | 34.252 | -0.027 |
| 3 | 34.241 | 34.251 | -0.031 |
| 4 | 34.241 | 34.251 | -0.029 |
| 5 | 34.241 | 34.251 | -0.027 |
| 6 | 34.24 | 34.251 | -0.03 |
| 7 | 34.24 | 34.25 | -0.031 |
| 8 | 34.239 | 34.25 | -0.032 |
| 9 | 34.239 | 34.249 | -0.03 |
| 10 | 34.237 | 34.248 | -0.033 |
| 11 | 34.239 | 34.247 | -0.023 |
| 12 | 34.229 | 34.246 | -0.048 |
| 13 | 34.222 | 34.245 | -0.066 |
| 14 | 34.225 | 34.244 | -0.056 |
| 15 | 34.225 | 34.242 | -0.049 |
| 16 | 34.226 | 34.24 | -0.041 |
| 17 | 34.227 | 34.239 | -0.034 |
| 18 | 34.226 | 34.238 | -0.036 |
| 19 | 34.23 | 34.236 | -0.017 |
| 20 | 34.226 | 34.236 | -0.029 |
| 21 | 34.214 | 34.235 | -0.061 |
| 22 | 34.226 | 34.235 | -0.027 |
| 23 | 34.225 | 34.235 | -0.03 |
| 24 | 34.234 | 34.235 | -0.0005 |
| 25 | 34.222 | 34.234 | -0.035 |

| No. | IDRONAUT | Sonda multiparamétrica | Error relativo |
|--------------------------------|----------|---------------------------|----------------|
| 26 | 34.221 | 34.234 | -0.038 |
| | (°C) | (°C) | (%) |
| 27 | 34.222 | 34.234 | -0.034 |
| 28 | 34.212 | 34.233 | -0.063 |
| 29 | 34.218 | 34.233 | -0.044 |
| 30 | 34.218 | 34.232 | -0.043 |
| 31 | 34.217 | 34.232 | -0.045 |
| 32 | 34.216 | 34.231 | -0.045 |
| 33 | 34.208 | 34.23 | -0.063 |
| 34 | 34.213 | 34.229 | -0.045 |
| 35 | 34.213 | 34.227 | -0.042 |
| 36 | 34.212 | 34.226 | -0.039 |
| 37 | 34.213 | 34.224 | -0.035 |
| 38 | 34.213 | 34.224 | -0.032 |
| 39 | 34.213 | 34.223 | -0.03 |
| 40 | 34.205 | 34.221 | -0.048 |
| 41 | 34.213 | 34.221 | -0.023 |
| 42 | 34.212 | 34.22 | -0.025 |
| 43 | 34.211 | 34.22 | -0.027 |
| 44 | 34.211 | 34.22 | -0.028 |
| 45 | 34.215 | 34.22 | -0.016 |
| 46 | 34.208 | 34.22 | -0.034 |
| 47 | 34.207 | 34.22 | -0.038 |
| 48 | 34.206 | 34.22 | -0.04 |
| 49 | 34.205 | 34.22 | -0.044 |
| 50 | 34.204 | 34.22 | -0.045 |
| Error relativo total: 0.036% | | | |
| Error absoluto total: 0.012 °C | | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6*Resultados de las mediciones de la conductividad*

| No. | IDRONAUT | Sonda multiparamétrica | Error relativo |
|-----|-----------|---------------------------|----------------|
| | (S/cm) | (S/cm) | (%) |
| 1 | 0.0363988 | 0.0364935 | -0.2603 |
| 2 | 0.0363984 | 0.0364921 | -0.2574 |
| 3 | 0.0363981 | 0.0364921 | -0.2584 |
| 4 | 0.0363978 | 0.0364947 | -0.2663 |
| 5 | 0.0363975 | 0.0364921 | -0.2599 |
| 6 | 0.0363972 | 0.0364883 | -0.2504 |
| 7 | 0.0363969 | 0.0364911 | -0.259 |
| 8 | 0.0363965 | 0.0364925 | -0.2637 |
| 9 | 0.0363965 | 0.0364887 | -0.2536 |
| 10 | 0.0363963 | 0.036485 | -0.2437 |
| 11 | 0.0363959 | 0.0364812 | -0.2343 |
| 12 | 0.0363955 | 0.0364826 | -0.2394 |
| 13 | 0.0363952 | 0.0364814 | -0.2369 |
| 14 | 0.0363949 | 0.0364814 | -0.2376 |
| 15 | 0.0363947 | 0.0364814 | -0.2381 |
| 16 | 0.0363946 | 0.0364824 | -0.2413 |
| 17 | 0.0363944 | 0.0364822 | -0.2411 |
| 18 | 0.0363944 | 0.036482 | -0.2405 |
| 19 | 0.0363944 | 0.0364843 | -0.247 |
| 20 | 0.0363945 | 0.0364855 | -0.25 |
| 21 | 0.0363946 | 0.0364879 | -0.2563 |
| 22 | 0.0363946 | 0.0364863 | -0.2518 |
| 23 | 0.0363945 | 0.0364849 | -0.2484 |
| 24 | 0.0363945 | 0.0364849 | -0.2483 |
| 25 | 0.0363945 | 0.0364849 | -0.2484 |
| 26 | 0.0363942 | 0.0364823 | -0.2419 |

| No. | IDRONAUT | Sonda multiparamétrica | Error relativo |
|-----|-----------|---------------------------|----------------|
| | (S/cm) | (S/cm) | (%) |
| 27 | 0.036394 | 0.0364825 | -0.2431 |
| 28 | 0.0363939 | 0.0364773 | -0.2292 |
| 29 | 0.0363936 | 0.0364733 | -0.2191 |
| 30 | 0.0363933 | 0.0364695 | -0.2094 |
| 31 | 0.036393 | 0.0364697 | -0.2109 |
| 32 | 0.0363928 | 0.0364686 | -0.2082 |
| 33 | 0.0363926 | 0.0364662 | -0.2021 |
| 34 | 0.0363923 | 0.0364676 | -0.2068 |
| 35 | 0.0363919 | 0.0364704 | -0.2156 |
| 36 | 0.0363916 | 0.036469 | -0.2126 |
| 37 | 0.0363914 | 0.0364714 | -0.2196 |
| 38 | 0.0363911 | 0.0364726 | -0.2239 |
| 39 | 0.0363907 | 0.0364709 | -0.2204 |
| 40 | 0.0363902 | 0.0364733 | -0.2283 |
| 41 | 0.0363897 | 0.0364729 | -0.2285 |
| 42 | 0.0363892 | 0.0364767 | -0.2405 |
| 43 | 0.0363885 | 0.0364805 | -0.2527 |
| 44 | 0.036388 | 0.0364802 | -0.2535 |
| 45 | 0.0363878 | 0.0364816 | -0.258 |
| 46 | 0.0363875 | 0.0364816 | -0.2588 |
| 47 | 0.0363871 | 0.036483 | -0.2637 |
| 48 | 0.0363867 | 0.0364793 | -0.2545 |
| 49 | 0.036386 | 0.0364753 | -0.2452 |
| 50 | 0.0363857 | 0.0364755 | -0.2468 |

Error relativo total: 0.2405 %

Error absoluto total: 87.6 μ S/cm

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7*Resultados de las mediciones de la salinidad*

| No. | IDRONAUT | Sonda multiparamétrica | Error relativo |
|-----|----------|---------------------------|----------------|
| | (mg/l) | (mg/l) | (%) |
| 1 | 20.795 | 20.787 | 0.039 |
| 2 | 20.795 | 20.787 | 0.04 |
| 3 | 20.796 | 20.787 | 0.041 |
| 4 | 20.796 | 20.787 | 0.042 |
| 5 | 20.796 | 20.787 | 0.043 |
| 6 | 20.796 | 20.787 | 0.043 |
| 7 | 20.796 | 20.787 | 0.043 |
| 8 | 20.796 | 20.787 | 0.042 |
| 9 | 20.796 | 20.787 | 0.042 |
| 10 | 20.796 | 20.787 | 0.042 |
| 11 | 20.796 | 20.787 | 0.043 |
| 12 | 20.796 | 20.787 | 0.043 |
| 13 | 20.796 | 20.787 | 0.042 |
| 14 | 20.796 | 20.787 | 0.042 |
| 15 | 20.795 | 20.787 | 0.041 |
| 16 | 20.795 | 20.787 | 0.04 |
| 17 | 20.795 | 20.787 | 0.04 |
| 18 | 20.795 | 20.787 | 0.039 |
| 19 | 20.795 | 20.787 | 0.039 |
| 20 | 20.795 | 20.787 | 0.039 |
| 21 | 20.795 | 20.787 | 0.039 |
| 22 | 20.795 | 20.787 | 0.039 |
| 23 | 20.795 | 20.787 | 0.04 |
| 24 | 20.795 | 20.787 | 0.04 |
| 25 | 20.796 | 20.787 | 0.041 |

| No. | IDRONAUT | Sonda multiparamétrica | Error relativo |
|----------------------------------|----------|---------------------------|----------------|
| | (mg/l) | (mg/l) | (%) |
| 26 | 20.796 | 20.787 | 0.042 |
| 27 | 20.796 | 20.787 | 0.043 |
| 28 | 20.796 | 20.787 | 0.043 |
| 29 | 20.796 | 20.787 | 0.043 |
| 30 | 20.796 | 20.787 | 0.043 |
| 31 | 20.796 | 20.787 | 0.044 |
| 32 | 20.796 | 20.787 | 0.044 |
| 33 | 20.796 | 20.787 | 0.043 |
| 34 | 20.796 | 20.787 | 0.043 |
| 35 | 20.796 | 20.787 | 0.043 |
| 36 | 20.796 | 20.787 | 0.042 |
| 37 | 20.796 | 20.787 | 0.041 |
| 38 | 20.795 | 20.787 | 0.041 |
| 39 | 20.795 | 20.787 | 0.04 |
| 40 | 20.795 | 20.787 | 0.04 |
| 41 | 20.795 | 20.787 | 0.039 |
| 42 | 20.795 | 20.787 | 0.039 |
| 43 | 20.795 | 20.787 | 0.038 |
| 44 | 20.795 | 20.787 | 0.038 |
| 45 | 20.795 | 20.787 | 0.039 |
| 46 | 20.795 | 20.787 | 0.038 |
| 47 | 20.795 | 20.787 | 0.039 |
| 48 | 20.795 | 20.787 | 0.039 |
| 49 | 20.795 | 20.787 | 0.039 |
| 50 | 20.795 | 20.787 | 0.039 |
| Error relativo total: 0.0409% | | | |
| Error absoluto total: 0.0085mg/l | | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8*Resultados de las mediciones de la turbidez*

| No. | IDRONAUT | Sonda multiparamétrica | Error relativo |
|-----|----------|---------------------------|----------------|
| | (NTU) | (NTU) | (%) |
| 1 | 0.027 | 0.026 | -0.03704 |
| 2 | 0.029 | 0.034 | 0.17241 |
| 3 | 0.027 | 0.026 | -0.03704 |
| 4 | 0.032 | 0.027 | -0.15625 |
| 5 | 0.029 | 0.028 | -0.03448 |
| 6 | 0.032 | 0.033 | 0.03125 |
| 7 | 0.027 | 0.026 | -0.03704 |
| 8 | 0.026 | 0.03 | 0.15385 |
| 9 | 0.027 | 0.035 | 0.2963 |
| 10 | 0.032 | 0.029 | -0.09375 |
| 11 | 0.034 | 0.031 | -0.08824 |
| 12 | 0.033 | 0.025 | -0.24242 |
| 13 | 0.027 | 0.026 | -0.03704 |
| 14 | 0.035 | 0.033 | -0.05714 |
| 15 | 0.035 | 0.027 | -0.22857 |
| 16 | 0.034 | 0.035 | 0.02941 |
| 17 | 0.033 | 0.03 | -0.09091 |
| 18 | 0.029 | 0.031 | 0.06897 |
| 19 | 0.03 | 0.027 | -0.1 |
| 20 | 0.03 | 0.027 | -0.1 |
| 21 | 0.028 | 0.034 | 0.21429 |
| 22 | 0.03 | 0.032 | 0.06667 |
| 23 | 0.03 | 0.03 | 0.1 |
| 24 | 0.033 | 0.033 | -0.09091 |
| 25 | 0.032 | 0.03 | -0.0625 |

| No. | IDRONAUT | Sonda multiparamétrica | Error relativo |
|---------------------------------|----------|---------------------------|----------------|
| | (NTU) | (NTU) | (%) |
| 26 | 0.029 | 0.028 | -0.03448 |
| 27 | 0.035 | 0.034 | -0.02857 |
| 28 | 0.035 | 0.031 | -0.11429 |
| 29 | 0.026 | 0.025 | -0.03846 |
| 30 | 0.033 | 0.028 | -0.15152 |
| 31 | 0.025 | 0.034 | 0.4 |
| 32 | 0.035 | 0.031 | -0.11429 |
| 33 | 0.026 | 0.035 | 0.34615 |
| 34 | 0.031 | 0.027 | -0.12903 |
| 35 | 0.026 | 0.03 | 0.15385 |
| 36 | 0.033 | 0.034 | 0.0303 |
| 37 | 0.029 | 0.035 | 0.2069 |
| 38 | 0.034 | 0.033 | -0.02941 |
| 39 | 0.026 | 0.032 | 0.23077 |
| 40 | 0.034 | 0.025 | -0.26471 |
| 41 | 0.03 | 0.03 | 0.06667 |
| 42 | 0.031 | 0.029 | -0.06452 |
| 43 | 0.034 | 0.026 | -0.23529 |
| 44 | 0.028 | 0.029 | 0.03571 |
| 45 | 0.033 | 0.027 | -0.18182 |
| 46 | 0.035 | 0.025 | -0.28571 |
| 47 | 0.027 | 0.031 | 0.14815 |
| 48 | 0.026 | 0.031 | 0.19231 |
| 49 | 0.027 | 0.033 | 0.22222 |
| 50 | 0.029 | 0.029 | 0.06897 |
| Error relativo total: 0.0697% | | | |
| Error absoluto total: 0.192 NTU | | | |

Fuente: elaboración propia.

Se observó que los errores relativos representativos a cada sensor de la sonda multiparamétrica propuesta son menores al 1 %. En este sentido, se concluyó que el funcionamiento de la sonda es eficiente.

Conclusiones y trabajo futuro

El agua es uno de los recursos naturales más importantes para la población en general, de tal forma que su cuidado a nivel mundial es una de las prioridades para todos los sectores. Muchas organizaciones y empresas de todos los niveles han fomentado campañas de limpieza y cuidado del agua, desde la concientización de la población hasta el diseño e implementación de sistemas para conocer su calidad y aplicar medidas correctivas para su cuidado.

En particular, en el mercado existen numerosos dispositivos que permiten evaluarla, sin embargo, la mayoría son inalcanzables para la sociedad en general debido a sus elevados costos. En este sentido, en este trabajo de investigación se consideró el diseño de una sonda multiparamétrica que permitiera medir algunos de los parámetros más importantes para determinar la calidad del agua, siendo estos: salinidad, temperatura y la turbidez.

El diseño de la sonda multiparamétrica empleó tecnología Arduino, al ser esta de acceso libre y de bajo costo. Con esto se buscó disminuir el costo que representa la adquisición de un dispositivo para medir la calidad del agua.

Del mismo modo, se realizó el diseño local de los sensores de salinidad y turbidez, para evitar aumentar costos y garantizar el funcionamiento adecuado de la sonda. Además, se adquirió un sensor de temperatura impermeable de bajo costo. Además, para aumentar la precisión de las mediciones realizadas con los sensores, a cada uno de los sensores se le integró un amplificador y un filtro.

La validación de la funcionalidad de la sonda multiparamétrica propuesta se efectuó a través de su comparación con una sonda comercial. Para esto se calculó el porcentaje de error entre los resultados de las mediciones realizadas por ambas sondas en muestras de agua previamente preparadas en un ambiente controlado.

Con base en los resultados obtenidos del proceso de validación se concluyó que la sonda multiparamétrica propuesta es capaz de adquirir, procesar y almacenar eficientemente a los parámetros considerados en este trabajo para medir la calidad del agua. Lo anterior, demuestra que la sonda propuesta en este trabajo de investigación es equiparable a una sonda comercial, en cuanto a la precisión de sus mediciones, de tal manera que puede ser usada para medir la calidad del agua.

Finalmente, como trabajo futuro se invita a los investigadores a continuar añadiendo sensores que permitan la medición de otros parámetros que coadyuven a determinar la calidad del agua. Así mismo, se alienta a reproducir la sonda

propuesta en este trabajo, en otros proyectos de investigación que permitan la generación de nuevas e innovadoras formas de mantener saludable este recurso natural.

Referencias

- Adafruit. (s.f.). *RTCLib - Arduino Reference. Arduino*. <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/rctlib/>
- Aravamudhan, S., Bhat, S., Bethala, B., Bhansali, S. y Langebrake, L. (2005). *MEMS based conductivity-temperature-depth (CTD) sensor for harsh oceanic environment*. OCEANS 2005, Proceedings of MTS/IEEE.Vol. 2.
- Burton, M. (s.f.). *DallasTemperature-Arduino Reference. Arduino*. <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/dallastemperature/>
- Cortés, M., Otero, T., Méndez, M., Suárez, M., Díaz, M., y Vera, E. (2006). Desarrollo de sensores electroquímicos. *Revista Colombiana de Física*, 38, Issue 4 (pp. 1355-1358).
- DallasTemperature-Arduino Reference. (s.f.). *Arduino. Cc*. <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/dallastemperature/>
- Endress+Hauser México. (s.f.). *Sensores de turbidez del agua y turbidímetros*. <https://www.mx.endress.com/es/instrumentacion-campo/analisis-agua-liquidos-industria/turbidimetros-sensores-turbidez-agua>
- Federation, W. (2012). APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for examination of water and wastewater. *Anales de Hidrología Médica*, 5(2), 185-186.
- Geek Factory. (2022, 24 marzo). *DS18B20 Sensor de temperatura sumergible*. <https://www.geekfactory.mx/tienda/sensores/ds18b20-sensor-de-temperatura-sumergible/>
- GeoEnciclopedia. (2016, 19 octubre). *Propiedades del Océano - Información y Características. Información y Características | Ciencias de la Tierra*. <https://www.geoenciclopedia.com/propiedades-del-oceano/#:%7E:text=La%20densidad%20del%20agua%20de,%20la%20temperatura%20del%20agua>.
- Greiman, W. (2019, 24 diciembre). *Arduino-SD. Arduino*. <https://www.arduino.cc/en/reference/SD>.
- Gytre, T. (1976). The use of a high sensitivity ultrasonic current meter in an oceanographic data acquisition system. *Radio and Electronic Engineer*, 46(12), 617-623.
- Idronaut S.r.l. (2022, 15 abril). *OS310. Idronaut*. <https://www.idronaut.it/multiparameter-ctds/environmental-ctds/os310-environmental-ctds/>
- Ocean Instruments. (2006). *Conductivity, Temperature and Depth (CTD) Sensors*. <http://www.whoi.edu/instruments/viewInstrument.do?id=1003>
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. (1999). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- TinyDHT sensor library-Arduino Reference. (2016, 25 agosto). *Arduino. Cc*. <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/tinydht-sensor-library/>

Sección II

Análisis de nuevos materiales
en la ingeniería

Evaluación del pavimento asfáltico recuperado (RAP) como sustituyente del agregado mineral en una carpeta asfáltica nueva mediante algoritmos de redes neuronales artificiales (RNA)

*Raúl Alejandro Morales Rivera¹
Juana Treviño Trujillo²
Ricardo Tobías Jaramillo³*

Resumen

El uso de Material Asfáltico Recuperado (RAP por sus siglas en inglés), como parte constituyente de las mezclas asfálticas usadas en la rehabilitación, así como la construcción de carpetas asfálticas nuevas es una tecnología relativamente desconocida y de poco uso en México, principalmente por la falta de información técnica y metodológica para su correcta aplicación. En esta investigación se propone una metodología para la predicción de las características de estabilidad y flujo de una carpeta asfáltica nueva, en la que se ha usado RAP como reemplazo total del agregado mineral grueso; se buscó adaptar la normativa vigente para obtener información estadística de campo y laboratorio de las propiedades y características físicas y químicas de los agregados y asfalto constituyentes de las muestras de RAP, con el propósito de generar un modelo matemático predictivo de las características de estabilidad de una carpeta asfáltica diseñada mediante el método Marshall, pero utilizando RAP como sustituyente de los agregados minerales vírgenes, aplicando un algoritmo predictivo de aprendizaje automático usando una Red Neuronal Artificial Profunda (RNA/DNN) para el análisis de los datos.

Palabras clave: pavimento recuperado, sustentabilidad, redes neuronales artificiales.

^{1 2 3} Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller” (FIANS), Universidad Autónoma de Tamaulipas, México. alexrivera@gmail.com y/o jmtrevino@docentes.uat.edu.mx

Generalidades

El uso de pavimentación mediante mezclas asfálticas en carreteras y construcción de calles y vialidades comenzó a finales del siglo XIX y desde entonces ha crecido abruptamente, impulsado principalmente por el surgimiento de la industria automotriz. El desarrollo humano ha dependido en gran parte del uso de transporte carretero, tanto para uso comercial como personal; por lo que mucho esfuerzo científico y tecnológico se ha dedicado al desarrollo de materiales asfálticos, diseño de métodos de pavimentación, y métodos para la construcción y rehabilitación de carreteras, ya que las especificaciones requeridas para la construcción de éstas son cada día más estrictas.

Para el caso de construcción y reparación de carreteras, en México se está implementando el uso de materiales recuperados de carpetas asfálticas (RAP) con asfaltos modificados, buscando e implementando técnicas más eficientes para la reducción de dichas emisiones.

Incluir RAP en nuevos pavimentos de mezclas asfálticas tiene numerosas ventajas para el medio ambiente, estos incluyen una reducción de la huella de carbono del pavimento o de cualquiera de sus usos finales, la conservación de los recursos naturales hace de la pavimentación asfáltica una excelente práctica de la sustentabilidad (Chang et al., 2012).

Debido a las ventajas técnicas, económicas y ambientales de las tecnologías de reciclado en sitio, estas han crecido de manera importante, principalmente en los países más industrializados, porque son la mejor alternativa para la fabricación de carpetas asfálticas de alto desempeño.

Planteamiento del problema

De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) al año 2014, la red nacional de caminos mexicanos (RNC) contaba con un inventario de: 158 246 km de carreteras; 36 117 km de vías urbanas y 3397 km de elementos de transición, dando un total de 197 760 km de vialidades pavimentadas, de las cuales aproximadamente el 89% están pavimentadas con pavimentos asfálticos, lo que da un total de 158 208 km de carpeta asfáltica instalada en el país.

Una gran cantidad de material capaz de ser transformado en RAP es creado cada año, debido que una vez que el pavimento instalado llega al final de su vida útil, este debe ser rehabilitado o reconstruido, y el primer paso es la remoción de la superficie asfáltica mediante el uso de una fresadora mecánica.

Hoy en día existe muy poca información concerniente al tema del reciclado de pavimentos asfálticos, la mayoría de la información existente es generada en

países extranjeros, en idiomas diferentes al español; de igual manera, no existe mucha información acerca de métodos de prueba y diseño de mezclas asfálticas mediante emulsiones en frío debido a que históricamente estos diseños se han realizado de forma empírica, aplicando métodos estadísticos de regresión cuyos resultados muchas veces no son publicados ya que estos son considerados secretos industriales, lo cual a su vez limita el desarrollo tecnológico del país.

Las técnicas computacionales de aprendizaje automatizado, como las redes neurales artificiales, se han convertido en herramientas indispensables para el análisis de datos cuando se requiere identificar patrones y realizar predicciones sobre un proceso definido, obteniendo niveles de precisión bastante aceptables cuando se compara con los resultados de la experimentación directa en laboratorio, pero en mucho menor tiempo, esto siempre y cuando los datos de entrada sean suficientemente representativos del procedimiento a evaluar (Taylor, 2005).

En esta investigación se propone un algoritmo capaz de generar un modelo matemático predictivo de las propiedades de estabilidad y flujo, que son características principales de una mezcla de asfaltos modificados y material RAP como parte de los agregados, mediante un análisis de las características físicas y químicas de sus componentes, mediante una metodología de análisis de datos aplicando algoritmos de redes neurales artificiales.

Metodología

Para la correcta aplicación de los algoritmos de análisis de datos mediante redes neurales artificiales, se requieren dos bases de datos de entrada, una de las cuales será para el entrenamiento del algoritmo y la segunda para la evaluación y optimización de este (Bengio, 2003). Para la recolección de los datos de entrenamiento se requiere la evaluación de muestras de material mediante los métodos convencionales de laboratorio, mientras más detallada sea la información y más datos sea posible obtener, el algoritmo se adaptará mejor.

Metodología para la obtención de la base de datos de entrenamiento y validación

En este caso, los datos de entrenamiento se obtienen mediante el procedimiento tradicional para evaluación del pavimento asfáltico recuperado siguiendo los siguientes puntos:

1. El material asfáltico recuperado debe ser muestreado conforme al manual M-MMP- 4-05-001, Muestreo de Materiales Asfálticos.
2. El pavimento asfáltico recuperado muestreado anteriormente, será evaluado de acuerdo con el método de muestreo y pruebas de materiales N-CMT-4-04,

Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas y N-CMT-4-05-001, Calidad de Materiales Asfálticos, con el propósito de obtener los valores característicos del material recuperado, y asegurar cumplan con la norma vigente.

3. El pavimento recuperado será utilizado como sustituyente del agregado mineral, utilizando el manual M·MMP·4·05·034, Método Marshall para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa, para la evaluación de su uso y aplicación en carpeta asfáltica nueva.

De acuerdo con estos puntos, la base de datos de entrenamiento seguirá el siguiente diagrama:

Figura 1

Proceso de obtención de los datos de entrenamiento y evaluación



Fuente: elaboración propia.

Adecuación de la base de datos

Para los datos de entrada se eligieron las siguientes variables de la caracterización del material RAP:

- Porcentaje de gravas
- Porcentaje de arenas
- Porcentaje de finos
- Granulometría
- Porcentaje de asfalto en la muestra

De los datos obtenidos de la aplicación del manual del Método Marshall para mezclas asfálticas de granulometría densa:

- Porcentaje de asfalto agregado
- Constante de anillo
- Altura de espécimen

Y las variables de salida se seleccionaron los datos de “estabilidad” y “flujo” característicos de las probetas elaboradas bajo el método Marshall. El algoritmo requiere que se ejecute una “normalización” de los datos de entrada, es decir, convertirlos a rangos entre -1 y 1, para ello se aplicó un algoritmo de normalización de los datos usando el lenguaje de programación Python, el cual es el siguiente:

Figura 2

Algoritmo de normalización de base de datos de entrada, en Python

```
#normalize data set
clean_dataset = rap_dataset.iloc[:, :-4]
min_d = clean_dataset.min()
max_d = clean_dataset.max()
lab_result_dataset = clean_dataset.iloc[:, -2:]
lab_min_d = lab_result_dataset.min()
lab_max_d = lab_result_dataset.max()
normalized_dataset=(clean_dataset - min_d)/(max_d - min_d)
rap_characterization_dataset = normalized_dataset.iloc[:, :-2]
rap_lab_results_dataset = normalized_dataset.iloc[:, -2:]
```

Fuente: elaboración propia.

Preselección de modelo predictivo (Tensorflow/py)

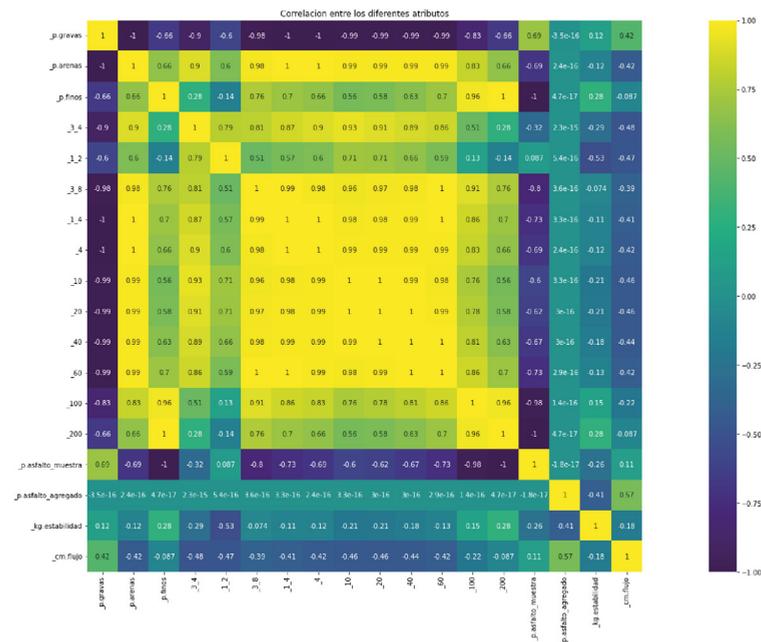
Como se mencionó anteriormente, el lenguaje de programación seleccionado fue Python, las librerías que se usaron para el análisis de los datos fueron: Pandas, Scikit-learn, Torch, Numpy y pyForest. Dentro de la preselección de los modelos a utilizar se eligieron los siguientes, debido a la cantidad y tipo de variables de entrada:

- Modelo 1: Regresión basada en un bosque de decisiones aleatorio.
- Modelo 2: Regresión basada en un meta-estimador AdaBoost.
- Modelo 3: Regresión basada en un bosque de decisiones simple.

Para evaluar la precisión de las predicciones de estos modelos sobre las bases de datos de entrada se obtuvo una base de datos de prueba de 60 probetas bajo el Método Marshall, utilizando 4 diferentes muestras de asfalto, generando 15 probetas por muestra, adicionando diferentes porcentajes y tipos de asfalto. Los datos de caracterización del RAP y valores Marshall fueron normalizados, y agregados a las bases de datos normalizadas para su uso en el entrenamiento y evaluación de los modelos previamente selectos.

Figura 3

Mapa de correlación entre los diferentes atributos



Fuente: elaboración propia.

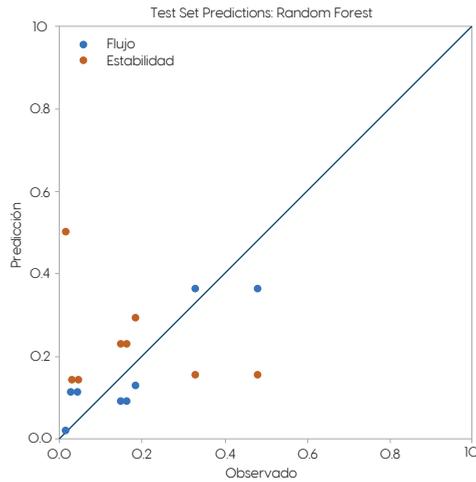
Resultados

Para la aplicación del modelo se definieron las variables de estabilidad y flujo como variables a predecir, y los tres modelos seleccionados fueron entrenados con los mismos datos de entrada.

Para la evaluación de la precisión en la predicción de cada modelo se dividió la base de datos en dos partes. La base de datos de entrenamiento fue formada al azar por 40 elementos del conjunto normalizado, y los 20 restantes se utilizaron para la base de datos de evaluación de la predicción. Se ingresaron los datos de entrada en el modelo y se compararon las predicciones generadas por el modelo con los resultados reales obtenidos en laboratorio, obteniendo:

Figura 4a

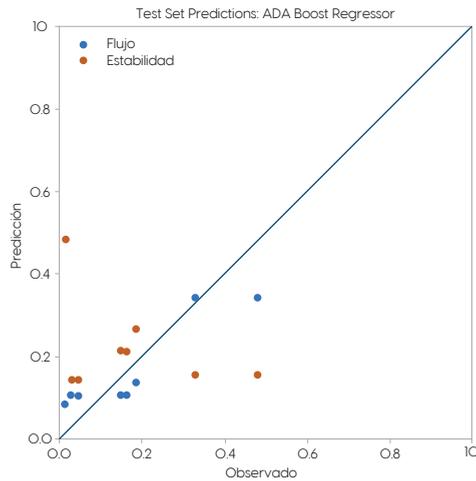
Resultados obtenidos de la predicción del modelo contra lo observado, aplicando el algoritmo de regresión basada en un bosque de decisiones aleatorio



Fuente: elaboración propia.

Figura 4b

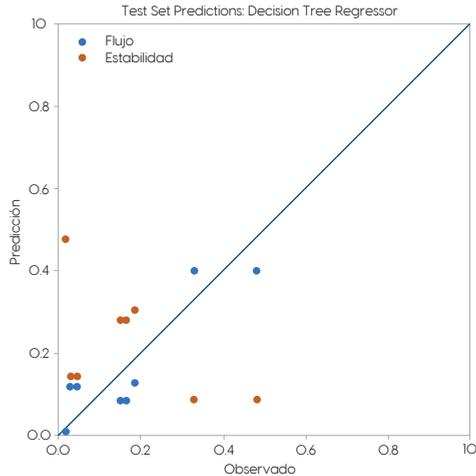
Resultados obtenidos de la predicción del modelo contra lo observado, aplicando el algoritmo de regresión basada en un meta-estimador AdaBoost



Fuente: elaboración propia.

Figura 4c

Resultados obtenidos de la predicción del modelo contra lo observado, aplicando el algoritmo de regresión basada en un bosque de decisiones simple



Fuente: elaboración propia.

Basados en estos resultados, y utilizando una métrica simple para cuantificar la calidad de las predicciones, se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 1

Resultados de precisión de las predicciones obtenidas de los modelos de red neuronal artificial aplicados a la base de datos de prueba contra lo observado en laboratorio

| Algoritmo | Precisión |
|-------------------------|-----------|
| Random Forest | 0.659611 |
| Ada Boost Regressor | 0.669465 |
| Decision Tree Regressor | 0.433098 |

Fuente: elaboración propia.

Se observa que las mejores predicciones fueron obtenidas por el modelo 2: regresión basada en un meta-estimador AdaBoost, sin embargo, esto no es concluyente de que sea el mejor modelo por utilizar, ya que es necesario obtener un set de datos con un mayor número de elementos para la base de entrenamientos, para lograr un nivel de precisión mayor.

Discusión y conclusiones

La aplicación de algoritmos de redes neuronales artificiales es una metodología relativamente simple en su aplicación, sin embargo, es importante identificar las variables de entrada y salida, así como seguir procedimientos adecuados para la obtención de los datos de entrenamiento para alimentar los algoritmos, los cuales deben ser consistentes, precisos, y de fácil aplicación, para que los datos obtenidos por los procedimientos de muestreo y caracterización del pavimento asfáltico recuperado sean representativos de los resultados obtenidos subsecuentemente, en las pruebas de laboratorio de las probetas de carpeta asfáltica nueva que han utilizado dicho material como sustituyente del agregado mineral, de esta manera se mejorará la precisión en las predicciones obtenidas a través del algoritmo.

Sin duda, esta herramienta reduce en gran medida el tiempo necesario para evaluar si las características del material recuperado cumplirán con la normativa vigente al ser usado como agregado mineral en una mezcla asfáltica bajo el método Marshall, sin embargo, es necesario continuar con la investigación ya que los resultados de precisión obtenidos aún pueden ser mejorados, buscando un algoritmo que trabaje mejor con el set de datos de entrada, o eligiendo diferentes variables de entrada, para optimizar el aprendizaje y predicción de los mismos.

Referencias

- Bengio, Y. (2012). *Practical recommendations for gradient-based training of deep architectures*. Neural Networks: Tricks of the Trade (second edition), pp. 437-478
- Blanco, R., Rodríguez, R., García-Garduño, M., y Castaño, V. (1995). Morphology and Tensile Properties of the Composite Asphalt-Butadiene-Styrene Copolymer. *J. Appl. Polym. Sci.*, 56, 57-64.
- Cañas, M. (1990). *Estudio Técnico Económico sobre El Método de Reciclaje de Pavimentos Asfálticos en Vías Urbanas y Carreteras*. Tesis UES.
- Gevrey, M., Dimopoulos, I., y Lek, S. (2003). Review and comparison of methods to study the contribution of variables in artificial neural network models. *Ecol. Model.*, 160(3), 249-264
- Instituto Americano del Asfalto. (1991). *MS-1 Thickness Design Asphalt Pavement for Highway & Streets*. Ninth Edition of the Institutes Thickness Design Manual. USA.
- Kandhal, P. y Mallick, R. (1997). *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments: Participant's Reference Book (FHWA-SA-98-042)*. Federal Highway Administration.
- Modarres, A., Rahimzadeh, M., y Zarrabi, M. (2014). Field investigation of pavement rehabilitation using cold in-place recycling. *Resour. Conserv. Recycl.*, 83, 112-120, 2014.
- Norma: M-MMP-4-05-006/00, Libro: "MMP. Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales", Parte: 4. Materiales para Pavimentos", Título: 06. "Materiales,

- Asfálticos, Aditivos y Mezclas", Capítulo: 001. "Calidad de Materiales Asfálticos", SCT, 15/08/00
- Norma: N-CMT-4-05-001/00, Libro: "CMT. Características de los Materiales", Parte: 4. "Materiales para Pavimentos", Título: 06. "Materiales, Asfálticos, Aditivos y Mezclas", Capítulo: 006. "Penetración en cementos y Residuos Asfálticos", SCT, 24/04/00 ASTM D2172 / D2172M-11, Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org
- Osorio, A. (1966). *Métodos para Calcular Espesores de Pavimentos Flexibles*. Tesis UES. Estabilización de Explanadas y reciclado *in situ* de firmes con cemento, Instituto Español del Cemento.
- Rogge, D. Gicks, R., Scholz, T., y Allen, D. (1992). Use of asphalt emulsions for in-place recycling: Oregon experience. *Transp. Res. Rec.*, (1342), pp. 18.
- Taylor, B. (2005). *Methods and Procedures for the Verification and Validation of Artificial Neural Networks*. Springer-Verlag, New York, Inc., Secaucus, NJ, USA.
- Yan, J., Zhu, H., Zhang, Z., Gao, L., y Charmot, S. (2014). The theoretical analysis of the RAP aged asphalt influence on the performance of asphalt emulsion cold recycled mixes. *Constr. Build. Mater.*, 71, 444-450.

Análisis de las propiedades mecánicas de un concreto con la adición de vidrio reciclado

Rodolfo Barragán Ramírez¹

Marcos Alfredo Azuara Hernández²

Edgar Nicolás Arteaga Campos³

Resumen

Disminuir el impacto ambiental en la producción de concreto se puede lograr reduciendo la cantidad de cemento necesaria para producirlo. En la actualidad existen una amplia gama de materiales que pueden incorporarse al concreto en sustitución del cemento. Existen investigaciones donde se establece que el vidrio tiene gran potencial para sustituir un material puzolánico en el concreto cuando es utilizado como partículas molidas finamente, en intervalos de tamaños de partícula menores de 30-75 μm . Entre más fino sea el vidrio, pasará de ser un material con alta resistencia a un material con propiedades puzolánicas (Anguiano, 2015).

Los concretos convencionales son diseñados para colocarse en diferentes estructuras o elementos, siendo utilizados a diario en la mayoría de las obras. Sin embargo, estos concretos, para mantener sus propiedades reológicas, requieren un estricto control de calidad para fines de la calidad del producto terminado.

Esta investigación tiene como objetivo fabricar un producto, a partir de vidrio reciclado, triturado y cribado, como un *filler* para disminuir el consumo de cemento en mezclas de concreto convencional. Para su aprovechamiento Se determinará el porcentaje (%) óptimo de vidrio reciclado que pueda reemplazar al cemento Portland, así como un tiempo de molienda idóneo, que permita aprovechar vidrio en el concreto sin afectar sus propiedades de manera negativa, minimizando a la vez el consumo de energía (Anguiano, 2015)

Palabras clave: concreto, reciclado, vidrio, ecología.

^{1 2 3} Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller” (FIANS), Universidad Autónoma de Tamaulipas, México rbarrag@docentes.uat.edu.mx

Generalidades

Hoy en día, las nuevas tecnologías existentes para el diseño de los concretos ha dado lugar a la creación de nuevos concretos de alto comportamiento, lo cual se traduce en la satisfacción que demanda la industria de la construcción.

Al concreto típico que se utiliza en las obras de construcción normalmente no se le añade ningún tipo de aditivo y la resistencia oscila entre los 100 y 300 kg/cm². Este tipo de concreto es elaborado a través de diversos agregados (arena, grava), cuyos tamaños máximos estarán en función del elemento estructural a colar.

Además de las ventajas y desventajas que conlleva el uso del concreto normal (Portland) con vidrio reciclado molido, su diseño involucra las siguientes consideraciones: realizar en la zona las correspondientes investigaciones para determinar el tipo de agregado y el tamaño máximo del agregado grueso, para poder emplear e integrar el uso de vidrio reciclado y observar sus comportamientos con ellos. Cuando se utiliza gran cantidad de agregado fino en la fabricación de concreto normal (Portland) con vidrio reciclado molido, se tiene un efecto mayor en el medio ambiente, solamente se hace uso de cemento normal (Portland). Para evitar esto, en el concreto normal con vidrio reciclado molido se adicionan generalmente materiales: puzolanas, ceniza, caliza, productos reciclados, entre otros.

Para cubrir la necesidad de agregado fino y con el fin de darle estabilidad al concreto, disminuyendo un alto consumo aquel, se analiza la adición de vidrio reciclado molido y cribado en el concreto, para sustituir el cemento normal (Portland), y así satisfacer el incremento de materiales finos en el cemento; sin embargo, al estar compuesto por sílice, presenta daños al concreto a causa de expansiones como consecuencia de la reacción álcali-sílice, esto sucede cuando el vidrio reciclado es utilizado con tamaños de partícula en el intervalo de los agregados, porque es necesario su molienda pulverización. Al adicionarlo al concreto, se observa que presenta un tamaño máximo de partícula a partir del cual no se manifiestan expansiones que causen daño producto de la reacción álcali-sílice, presentando el material propiedades puzolánicas (Anguiano, 2015).

Importancia del proyecto

Para que sea considerada la reutilización del vidrio reciclado es forzosa una trituración inicial del material y una posterior granulación del producto por el proceso de mallas tamizadoras, puede que el producto final no tenga la misma calidad que la materia original.

Una alternativa para utilizar vidrio reciclado es en la elaboración de la mezcla de concreto utilizando cemento normal (Portland), donde en algunas ocasiones se ha logrado tener resultados favorables al emplearlo en sustitución del

agregado fino, no obstante, existen una cantidad de casos al respecto, que en su mayoría hacen hincapié en el uso de vidrio utilizado para la fabricación de botellas de vidrio (sódico-cálcicos), por su gran disponibilidad.

En esta investigación se analiza el beneficio de la utilización de materiales reciclados a base de vidrio molido, para de esta manera hacer reducción del RAS, CO² y mejorar el medio ambiente, así como una reducción de costos de esta.

Alcance del proyecto

Analizar el efecto por la adición de vidrio reciclado molido para mezclas de concreto normal a base de cemento Portland.

La investigación se manejó en diferentes etapas. La primera tuvo como objetivo determinar qué materia prima se debe utilizar; se encuestó a empresas concretoras de la zona para saber de antemano que materia prima prevalece, por lo cual, el 100% de estas empresas usan materiales calizos, que se extraen de canteras de la Sierra Madre Oriental y la mayoría usa Cemento Portland Tipo 1. Se estudió la calidad de cada uno de estos materiales (grava triturada caliza T.M.A 19 mm, arena triturada caliza malla 4, y cemento CPO 40 Tipo 1, procedentes de Tamuín, San Luis Potosí, marca Cemex), siguiendo estrictamente parámetros y estándares de las normas mexicanas vigentes.

La segunda etapa del proyecto consistió en agregar vidrio reciclado molido con el mismo consumo de cemento Portland, en distintos porcentajes, obteniendo así la matriz experimental para el diseño de mezclas. Para cada mezcla se determinaron sus propiedades en estado fresco y endurecido, con mediciones de su desempeño mecánico, así como de indicadores de su durabilidad.

Y por último, una vez teniendo los resultados y comportamientos de cada una de las matrices experimentales, se realizaron las correspondientes conclusiones.

Problemática en la edificación con concreto de cemento Portland

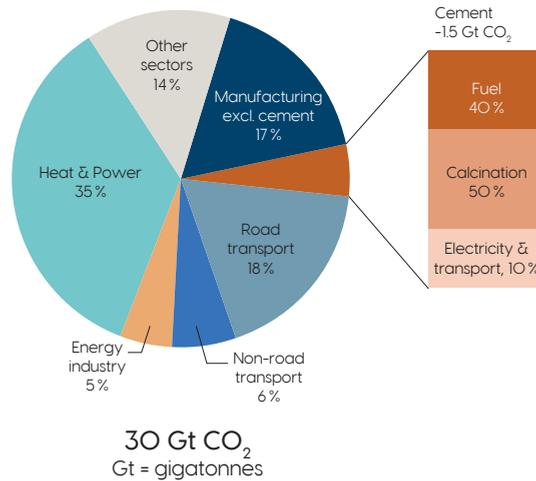
El concreto elaborado con cemento normal Portland es el material de mayor uso en la industria de la construcción por sus propiedades: resistencia a la compresión, durabilidad, economía y versatilidad. En el mundo el uso del cemento es de aproximadamente de 1 tonelada por habitante. Como consecuencia de su masivo consumo, aun reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero, su proceso puede tener un efecto característico en el ambiente.

El cemento Portland es el principal contribuyente en la emisión de gases de efecto invernadero en la fabricación de concreto, debido a que en su producción se necesita grandes cantidades de energía para obtener la materia prima, así como combustibles para mantener las temperaturas de los hornos de Clinker para la

generación de cada una de las fases del cemento; trayendo como consecuencia que la producción de 1 tonelada de cemento Portland emita a la atmósfera aproximadamente 1 tonelada de dióxido de carbono (CO²) (Anguiano, 2015).

Figura 1

Producción mundial de CO²



Fuente: elaboración propia.

En México se consumen 118 kwh de energía eléctrica para producir 1 tonelada de cemento Portland. Para disminuir el impacto ambiental en la elaboración de concreto, se han tomado diversas medidas:

- La disminución del consumo de cemento para la fabricación de concreto.
- Emplear cenizas naturales o polvos minerales en sustitución de cemento.
- Fabricar concretos durables, sin considerar el tipo de ambiente en el que se localice.

Objetivo general

Diseñar una mezcla de concreto óptimo siguiendo el método ACI 211 con la adición de ciertas proporciones en porcentaje de vidrio reciclado para incorporarlo como un concreto convencional.

Hipótesis

Para esta investigación se propone aprovechar el vidrio reciclado como adición en el concreto convencional, que nos va a permitir reducir la relación de cemento de la mezcla y optimizar sus características reológicas, sin comprometer sus propiedades y mejorar su durabilidad.

Resumen de las pruebas ejecutadas

1. Prueba de compresión en cilindros de 10 x 20 cm

Para determinar la resistencia a la compresión se realizan pruebas en especímenes cilíndricos de concreto a 28 días de edad en una prensa hidráulica de ensayos de compresión, la carga máxima se determina a partir de la carga de ruptura dividida entre el área de la sección transversal y se reporta en kg/cm^2 (CEMEX, 2019).

Para este caso la muestra patrón presentó esfuerzos en promedio del orden de $418.8 \text{ kg}/\text{cm}^2$, mientras que la muestra con adición de 3% de vidrio presentó $408.6 \text{ kg}/\text{cm}^2$, y la muestra con 6% de vidrio adicionado presentó esfuerzos de $348 \text{ kg}/\text{cm}^2$, si consideramos la muestra patrón bajo un diseño de $420 \text{ kg}/\text{cm}^2$ se tienen porcentajes de 99.7, 97.3 y 82.9% Respectivamente.

2. Prueba a compresión en cubos de 10 x 10 cm

Para el caso de los cubos la muestra patrón presentó esfuerzos en promedio del orden de $424.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$, mientras que la muestra con adición de 3% de vidrio presento $423.8 \text{ kg}/\text{cm}^2$, y la muestra con 6% de vidrio adicionado presentó esfuerzos de $371.4 \text{ kg}/\text{cm}^2$, si consideramos la muestra patrón bajo un diseño de $420 \text{ kg}/\text{cm}^2$ se tienen porcentajes de 101, 100 y 88.4% respectivamente.

3. Prueba de flexión en vigas 15 x 15 x 60 cm

La determinación de la resistencia a la flexión de probetas prismáticas de concreto, simplemente apoyadas; prueba que se realiza para determinar el módulo de ruptura (MR) del concreto. Para este caso la muestra testigo (patrón) presentó una resistencia a la tensión por flexión (MR) en promedio del orden de $43.3 \text{ kg}/\text{cm}^2$, mientras que la muestra con adición de 3% de vidrio presentó $46.8 \text{ kg}/\text{cm}^2$, y la muestra con 6% de vidrio adicionado presentó esfuerzos de $31.8 \text{ kg}/\text{cm}^2$, si consideramos la muestra patrón bajo un diseño de $45.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$ se tienen porcentajes de 96.2, 104 y 70.6%.

4. Prueba de tensión indirecta en cilindros de 10 x 20 cm

Determinar la resistencia a la compresión diametral del concreto por medio de una prueba indirecta (prueba brasileña). Para este caso la muestra patrón presentó una tensión indirecta del orden de $31.1 \text{ kg}/\text{cm}^2$, mientras que la muestra con adición

de 3% de vidrio presentó 29.7 kg/cm², y la muestra con 6% de vidrio adicionado presentó esfuerzos de 33.2 kg/cm². En esta prueba la adición de 6% de vidrio, aporta el mayor esfuerzo en cuanto a una combinación de esfuerzos de tensión y compresión.

Resultados

Todas las pruebas de diseños con porcentaje de vidrio para un volumen de 0.070 m³ se practicaron el 30 de marzo de 2022 en la Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller” (UAT FIANS).

Resultados en estado fresco concreto convencional $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$

Tabla 1

*Muestra patrón + 3% de vidrio cilindros Mu (10*20 cm)*

*Probeta cilíndrica (10*20 cm) para 0.070 M3*

Diseños con porcentaje de vidrio

| Datos generales | | | | Datos de ensaye | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|---------------|-------------------------|------------|-----------------------------------|----------|------------------|
| Rev. (cm) | Fecha de colado | Fecha de ensayo | Edad (Días) | Peso (kg) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Área (cm ²) | Carga (kg) | Resistencia (kc/cm ²) | Esfuerzo | % de resistencia |
| 16.0 | 30-03-22 | 06-04-22 | 7 | 3.77 | 20.00 | 10.00 | 78.54 | 28 070 | 250 | 357 | 143 |
| 16.0 | 30-03-22 | 13-04-22 | 14 | 3.77 | 20.00 | 10.00 | 78.54 | 26 840 | 250 | 342 | 137 |
| 16.0 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | | | | 78.54 | | 250 | | |
| 16.0 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | | | | 78.54 | | 250 | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2

*Muestra patrón – cubos (10*10 cm)*

*Probeta cubicular 10*10 para 0.070 m³*

Diseños con porcentaje de vidrio

| Datos generales | | | | Datos de ensaye | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|---------------|-------------------------|------------|-----------------------------------|----------|------------------|
| Rev. (cm) | Fecha de colado | Fecha de ensayo | Edad (Días) | Peso (kg) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Área (cm ²) | Carga (kg) | Resistencia (kc/cm ²) | Esfuerzo | % de resistencia |
| 16.0 | 30-03-22 | 06-04-22 | 7 | 2.38 | 10.00 | 10.00 | 100 | 37 320 | 250 | 373 | 149 |
| 16.0 | 30-03-22 | 13-04-22 | 14 | 2.40 | 10.00 | 10.00 | 100 | 38 930 | 250 | 389 | 156 |
| 16.0 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | | | | 100 | | 250 | | |
| 16.0 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | | | | 100 | | 250 | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3*Muestra patrón + 6 % de porcentaje de vidrio – Vigas (15*50 cm)**Probeta rectangular 15*50 para 0.070 m³**Diseños con porcentaje de vidrio*

| Datos generales | | | | Datos de ensaye | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|---------------|-------------------------|------------|-----------------------------------|----------|------------------|
| Rev. (cm) | Fecha de colado | Fecha de ensayo | Edad (Días) | Peso (kg) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Área (cm ²) | Carga (kg) | Resistencia (kc/cm ²) | Esfuerzo | % de resistencia |
| 16.0 | 30-03-22 | 06-04-22 | 7 | --- | --- | --- | 75 | 2610 | 250 | 35 | |
| 16.0 | 30-03-22 | 13-04-22 | 14 | --- | --- | --- | 75 | 2860 | 250 | 38 | |
| 16.0 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | --- | --- | --- | 75 | | 250 | | |
| 16.0 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | --- | --- | --- | 75 | | 250 | | |

Fuente: elaboración propia.

Informe de resultados de pruebas a compresión

Tabla 4*Muestra patrón + 3 % de vidrio – cilindros (10*20 cm)**Probeta cilíndrica para 0.70 m³**Diseños con porcentaje de vidrio*

| Datos generales | | | | Datos de ensaye | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|---------------|-------------------------|------------|-----------------------------------|----------|------------------|
| Rev. (cm) | Fecha de colado | Fecha de ensayo | Edad (Días) | Peso (kg) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Área (cm ²) | Carga (kg) | Resistencia (kc/cm ²) | Esfuerzo | % de resistencia |
| 16.0 | 30-03-22 | 06-04-22 | 7 | 3.77 | 20.00 | 10.00 | 78.54 | 28 070 | 250 | 357 | 143 |
| 16.0 | 30-03-22 | 13-04-22 | 14 | 3.77 | 20.00 | 10.00 | 78.54 | 26 840 | 250 | 342 | 137 |
| 16.0 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | | | | 78.54 | | 250 | | |
| 16.0 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | | | | 78.54 | | 250 | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5*Muestra patrón + 3 % de vidrio – cubos (10*10 cm)**Probeta cubicular 10*10 para 0.070 m³**Diseños con porcentaje de vidrio*

| Datos generales | | | | Datos de ensaye | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|---------------|-------------------------|------------|-----------------------------------|----------|------------------|--|
| Rev. (cm) | Fecha de colado | Fecha de ensayo | Edad (Días) | Peso (kg) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Área (cm ²) | Carga (kg) | Resistencia (kc/cm ²) | Esfuerzo | % de resistencia | |
| 16.0 | 30-03-22 | 06-04-22 | 7 | 2.40 | 10.00 | 10.00 | 100 | 37 330 | 250 | 373 | 149 | |
| 16.0 | 30-03-22 | 13-04-22 | 14 | 2.40 | 10.00 | 10.00 | 100 | 38 930 | 250 | 389 | 157 | |
| 16.0 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | | | | 100 | | 250 | | | |
| 16.0 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | | | | 100 | | 250 | | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6*Muestra patrón + 3 % de vidrio – vigas (15*50 cm)**Probeta rectangular 15*50 para 0.070 m³**Diseños con porcentaje de vidrio*

| Datos generales | | | | Datos de ensaye | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|---------------|-------------------------|------------|-----------------------------------|----------|------------------|--|
| Rev. (cm) | Fecha de colado | Fecha de ensayo | Edad (Días) | Peso (kg) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Área (cm ²) | Carga (kg) | Resistencia (kc/cm ²) | Esfuerzo | % de resistencia | |
| 16.00 | 30-03-22 | 06-04-22 | 7 | ----- | ----- | ----- | 75 | 3090 | 250 | 41 | | |
| 16.00 | 30-03-22 | 13-04-22 | 14 | ----- | ----- | ----- | 75 | 3040 | 250 | 40 | | |
| 16.00 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | ----- | ----- | ----- | 75 | | 250 | | | |
| 16.00 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | ----- | ----- | ----- | 75 | | 250 | | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7*Muestra patrón + 3% de vidrio – cilindros (10*20 cm)**Probeta cilíndrica 10*20 para 0.070 m³**Diseños con porcentaje de vidrio*

| Datos generales | | | | Datos de ensaye | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|---------------|-------------------------|------------|-----------------------------------|----------|------------------|
| Rev. | Fecha de colado | Fecha de ensayo | Edad (Días) | Peso (kg) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Área (cm ²) | Carga (kg) | Resistencia (kc/cm ²) | Esfuerzo | % de resistencia |
| 16.0 | 30-03-22 | 06-04-22 | 7 | 3.70 | 19.90 | 10.00 | 78.54 | 25 830 | 250 | 329 | 132 |
| 16.0 | 30-03-22 | 13-04-22 | 14 | 3.75 | 20.00 | 10.00 | 78.54 | 24 540 | 250 | 312 | 125 |
| 16.0 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | | | | 78.54 | | 250 | | |
| 16.0 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | | | | 78.54 | | 250 | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8*Muestra patrón + 3 % de vidrio- cubos (10*10 cm)**Probeta cubicular 10*10 para 0.070 m³**Diseños con porcentaje de vidrio*

| Datos generales | | | | Datos de ensaye | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|---------------|-------------------------|------------|-----------------------------------|----------|------------------|
| Rev. | Fecha de colado | Fecha de ensayo | Edad (Días) | Peso (kg) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Área (cm ²) | Carga (kg) | Resistencia (kc/cm ²) | Esfuerzo | % de resistencia |
| 16.0 | 30-03-22 | 06-04-22 | 7 | 2.36 | 10.00 | 10.00 | 100 | 32 770 | 250 | 328 | 131 |
| 16.0 | 30-03-22 | 13-04-22 | 14 | 2.39 | 10.00 | 10.00 | 100 | 35 410 | 250 | 234 | 134 |
| 16.0 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | | | | 100 | | 250 | | |
| 16.0 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | | | | 100 | | 250 | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9*Muestra patrón + 3 % de vidrio – vigas (15*50 cm)**Probeta rectangular 15*50 para 0.070 m³**Diseños con porcentaje de vidrio*

| Datos generales | | | | Datos de ensaye | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|---------------|-------------------------|------------|-----------------------------------|----------|------------------|
| Rev. | Fecha de colado | Fecha de ensayo | Edad (Días) | Peso (kg) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Área (cm ²) | Carga (kg) | Resistencia (kc/cm ²) | Esfuerzo | % de resistencia |
| 16.0 | 30-03-22 | 06-04-22 | 7 | ----- | ----- | ----- | 75 | 2650 | 250 | 35 | |
| 16.0 | 30-03-22 | 13-04-22 | 14 | ----- | ----- | ----- | 75 | 2910 | 250 | 39 | |
| 16.0 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | ----- | ----- | ----- | 75 | | 250 | | |
| 16.0 | 30-03-22 | 27-04-22 | 28 | ----- | ----- | ----- | 75 | | 250 | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10*Muestra a 7 días*

| Probeta / Tipo de concreto | Muestra patrón (t) | Muestra patrón+ 3 % de vidrio (t) | Muestra patrón + 6 % de vidrio (t) |
|----------------------------|--------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Cilindros | 26 340 | 28 070 | 25 830 |
| Cubos | 37 320 | 37 330 | 32 770 |
| Vigas | 2610 | 3090 | 2650 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12*Muestra a 14 días*

| Probeta / Tipo de concreto | Muestra patrón (t) | Muestra patrón (t) + 3 % de vidrio (t) | Muestra patrón + 6 % de vidrio (t) |
|----------------------------|--------------------|--|------------------------------------|
| Cilindros | 28 760 | 26 840 | 24 540 |
| Cubos | 38 180 | 38 930 | 35 410 |
| Vigas | 2860 | 3040 | 2910 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12*Muestra a 14 días*

| Probeta / Tipo de concreto | Muestra patrón (t) | Muestra patrón (t) + 3 % de vidrio (t) | Muestra patrón + 6 % de vidrio (t) |
|-------------------------------|--------------------|--|------------------------------------|
| Cilindros | 32 180 | 31 190 | 26 880 |
| Cilindros | 33570 | 32 960 | 27 760 |
| Cubos | 41 510 | 41 580 | 37 830 |
| Cubos | 43 290 | 43 190 | 36 450 |
| Vigas | 3230 | 3400 | 2490 |
| Vigas | 3260 | 3620 | 2290 |

Fuente: elaboración propia.

Gráficas comparativas de concreto convencional $f'c=250$ kg/cm² a diferentes edades de ensayo, más el 3% de vidrio y 6% de vidrio

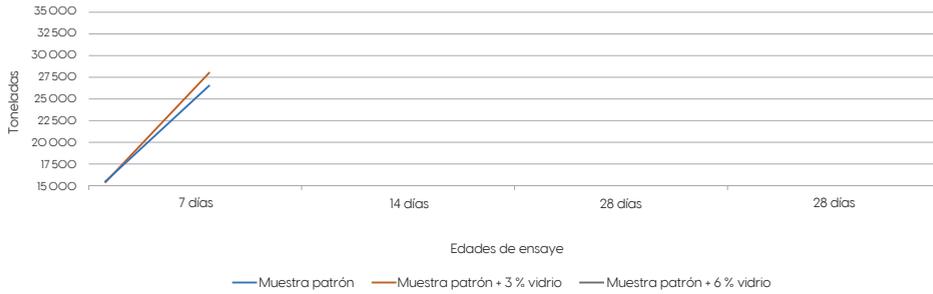
Tabla 13*Cilindros 10*20 cm*

| Cilindros 10*20 cm | | | |
|--------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Edades | Muestra patrón | Muestra patrón + 3 % vidrio | Muestra patrón + 6 % vidrio |
| 7 días | 26 340 | 28 070 | 25 830 |
| 14 días | 28 760 | 26 840 | 24 540 |
| 28 días | 32 180 | 31 190 | 26 880 |
| 28 días | 33 570 | 32 960 | 27 760 |

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 1

Cilindros 10*20 cm



Fuente: elaboración propia.

Tabla 14

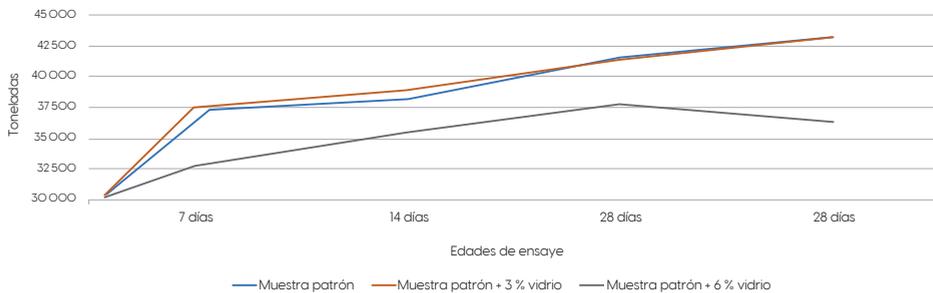
Cilindros 10*10 cm

| Cilindros 10*10 cm | | | |
|--------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Edades | Muestra patrón | Muestra patrón + 3 % vidrio | Muestra patrón + 6 % vidrio |
| 7 días | 37 320 | 37 330 | 32 770 |
| 14 días | 38 180 | 38 930 | 35 410 |
| 28 días | 41 510 | 41 580 | 37 830 |
| 28 días | 43 290 | 43 190 | 36 450 |

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 2

Cilindros 10*10 cm



Fuente: elaboración propia.

Tabla 15

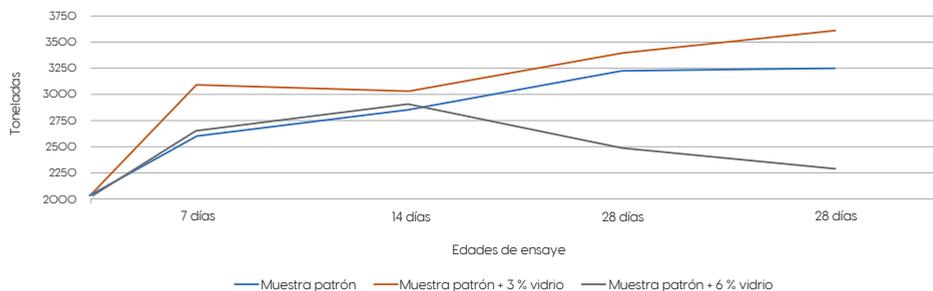
*Vigas de 15*50 cm*

| Cilindros 15*50 cm | | | |
|--------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Edades | Muestra patrón | Muestra patrón + 3 % vidrio | Muestra patrón + 6 % vidrio |
| 7 días | 2610 | 3090 | 2650 |
| 14 días | 2860 | 3040 | 2910 |
| 28 días | 3230 | 3400 | 2490 |
| 28 días | 3260 | 3620 | 2290 |

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 3

*Cilindros 15*50 cm*



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Los esfuerzos de compresión con la adición de vidrio en porcentaje del 3% disminuye o impacta ligeramente al concreto convencional en 1 o 2%, mientras que si adicionamos hasta un 6% los valores de esfuerzo disminuyen hasta un 15%.

En el caso de las pruebas de flexión (MR) se observó que la adición de 3% de vidrio aporta un 8% más de resistencia que la muestra patrón, mientras que si aumentamos la cantidad de vidrio a 6% disminuye un 27% para este tipo de prueba.

En el caso de tensión obtenida de forma indirecta en los especímenes, la adición del 3% de vidrio aporta 6% menos de resistencia mientras que la de 6% de adición de vidrio aporta 7% más de resistencia que la muestra patrón.

Por lo último, la adición de vidrio granulado impacta de manera positiva los esfuerzos de flexión y tensión en un concreto convencional, solo faltaría investigar

el porcentaje óptimo en la adición de vidrio, por lo que se recomienda realizar pruebas de tensión indirecta (prueba brasileña) con adiciones de 7 y 8 %.

Referencias

- ASTM C618-08a. (2008). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, y EFNARC. (2005). *European Guidelines for Self Consolidating Concrete: Specification, Production and Use*. <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>.
- Brow, R., y Schmitt, M. (2009). A survey of energy and environmental applications of glass. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(Issue 7), 1193-1201.
- Carrillo, J., Alcocer, S., y Aperador, W. (2012). Propiedades mecánicas del concreto para viviendas de bajo costo. *Ingeniería Investigación Y Tecnología, XIV*(2), 285-298.
- Catalán, J. (2013). *Estudio de la influencia del vidrio molido en hormigones grado h15, h20, y h30*. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/bmfic357e/doc/bmfic357e.pdf>
- CEMEX. (s.f.). *Cemento*. <http://archive.cemex.com/ES/ProductosServicios.aspx>
- Cortes, E. y Perilla, J. (2014). *Estudio comparativo de las características físico - mecánicas de cuatro cementos comerciales portland tipo I*. Bogotá (Colombia).
- Edwards, K. (2013). A critical study of the emergence of glass and glassy metals as “green” materials. *Materials and Design*, 50, 713-723.
- El siglo de Torreón(2015). *Reciclaje de vidrio, una actividad frágil*. <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/705633.reciclaje-de-vidriouna-actividad-fragil.html>
- Flower, D., y Sanjayan, J. (2007). Green House Gas Emissions due to Concrete Manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(Issue 5), 282-288.
- Jiménez, J. (2017). *Uso de materiales alternativos para mejorar las propiedades mecánicas del concreto (fibra de fique)*. Bogotá D.C 2011. <https://es.scribd.com/document/142003529/Usode-materiales-alternativos-para-mejorar-las-propiedades-mecA-nicas-del-concretoFibra-de-Fique>
- Kosmatka, S. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto* (1ra ed.). Portland Cement Association.
- Kratochvíl, J. (2014). The effect of boron and its compounds on the setting of Portland cement. *Advanced Materials Research*, 1000, 16-19.
- Malhotra, V. (2006). *Reducing CO² Emissions*. Concrete International.
- Mehta, P. (2001). Reducing the Environmental Impact of Concrete. *Concrete International*, 23(Issue 10).
- OECD. (2015). *La OCDE - OECD*. <http://www.oecd.org/centrodemexico/laocde/>
- Shi, C. y Zheng, K. (2007). A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources Conservation and Recycling*, 52(Issue 2), 234-247.

- Sunderland, C. (2005). *The Cement Sustainability Initiative Progress Report*. World Business Council for Sustainable Development.
- Taylor, M., Tam, C., y Gielen, D. (2006). *Energy Efficiency and CO² Emissions from the Global Cement Industry*. International Energy Agency- World Business Council for Sustainable Development.

Estudio y análisis de concreto reciclado, utilizado como agregado grueso en mezcla de concreto hidráulico

Rodolfo Barragán Ramírez¹

David Moreno Ramos²

Pamela Palmas Delgado³

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo principal evaluar el concreto con un $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ elaborado con agregados grueso-reciclados (concreto reciclado), y agregados finos naturales, y determinar sus propiedades físicas tanto en estado fresco como sólido. Los agregados reciclados se obtuvieron del producto de demolición de losas de las vialidades Ponciano Arriaga y Loma Verde, de la colonia Las Palmas Banrural, Pánuco, Veracruz. El material que se obtuvo del muestreo se llevó al laboratorio de materiales de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, Campus Tampico, para realizar las pruebas de caracterización de materiales, practicadas en los agregados de concreto reciclado, grava triturada, y agregados finos, se diseñaron mezclas del concreto por el método ACI, proponiendo una resistencia de $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$. Las proporciones obtenidas fueron: 1: 1.68: 2.40: 26.585 lbs/bolsa, para el concreto de muestra patrón, donde se utilizó grava triturada como agregado grueso, y 1: 1.80: 2.01: 31.83 lbs/bolsa, para la muestra con agregado grueso producto de concreto reciclado. Se mezcló el concreto, y se calcularon sus propiedades físicas en estado fresco, donde se obtuvieron los revenimientos de 10 y 7 cm, de la muestra patrón y la muestra con concreto reciclado, temperatura de 30.6 °C y 30.3 °C respectivamente, pesos volumétricos de 2297.183 kg/cm³ y 2249.29 kg/cm³, con contenidos de aire de 3 y 3.5 %, posteriormente se realizó el muestreo en probetas cilíndricas de 10.16 x 20.32 cm. Por último, se practicó el ensayo con compresión, obteniendo como resultado un 100.16 % de la resistencia de diseño propuesta para la muestra patrón, y 84.87 % de la muestra con concreto reciclado.

Palabras clave: agregado grueso, concreto hidráulico, concreto reciclado, revenimiento.

^{1 2 3} Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller” (FIANS), Universidad Autónoma de Tamaulipas, México. rbarrag@docentes.uat.edu.mx

Antecedentes

El concreto es uno de los materiales más utilizados en el mundo, está compuesto por agua, arena, grava y cemento. En este proyecto se pretende usar los escombros generados en obras civiles como agregado de concreto. Los escombros son un residuo de manejo especial (RME); la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) los define como desechos generados en los procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados peligrosos, residuos sólidos urbanos o resultado de los grandes generadores o residuos sólidos urbanos (Semarnat, 2017).

El uso de material reciclable de la construcción inició en Alemania desde la Segunda Guerra Mundial, debido a que durante este tiempo se generó una gran cantidad de escombros. El reciclado de los residuos de concreto para fabricar nuevos concretos se inició en Glushge en Rusia en 1946.

En México se comenzó a tomar conciencia de los residuos generados en la construcción en febrero de 2013 mediante la NOM-161- Semarnat-2011 donde se contempla como una obligación para los constructores que generen más de 80 m³ (Cámara Mexicana de Construcción, 2014).

Definición del problema

La problemática surge en la ciudad de Pánuco, debido a que en las construcciones civiles se genera gran cantidad de escombros, que es tirado y causa problemas ambientales debido a que su proceso de degradación es lento. La gran cantidad de residuos en la construcción obliga a establecer servicios especiales de recolección, almacenamiento y tratamiento, sin embargo, muchos de ellos se siguen vertiendo en ríos, lagunas, lagos y a sus riberas; se acumulan en terrenos baldíos, banquetas, barrancas, tiraderos a cielo abierto y vertederos, esto impacta el paisaje, el suelo y la calidad del aire.

Los residuos de la construcción llegan a representar entre un cuarto y un tercio de los residuos generados en un municipio. Para tener alguna referencia, tan sólo en la Ciudad de México se tienen contabilizadas más de un millón 200 mil toneladas anuales, el equivalente a poco más de tres mil toneladas por día (Semarnat, 2016).

Objetivos

Objetivo general

Estudiar el comportamiento de los escombros generados en las construcciones, empleados en mezclas de concreto hidráulico, como agregado grueso.

Objetivos específicos

- Delimitar la zona donde serán tomadas las muestras de desechos en la construcción o demolición de una construcción.
- Determinar las características y propiedades de los escombros generados, que serán utilizados.
- Elaborar un diseño de mezclas para un concreto hidráulico de una resistencia $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$.
- Analizar la resistencia a compresión que posee el concreto, en un lapso de 7, 14, 21 y 28 días.

Figura 1

Ubicación de estudios



Fuente: elaboración propia.

Delimitación

El presente trabajo de investigación se ejecuta en la calle Ponciano Arriaga, de la colonia Las Palmas Banrural, Pánuco Veracruz, con coordenadas, $22^{\circ} 03' 26.3'' \text{ N}$ $98^{\circ} 11' 25.4'' \text{ W}$ (ver Figura 1 y 2). Para la recaudación de datos se utiliza equipo de laboratorio de mecánica de suelos, de la Facultad de Ingeniería "Arturo Narro Siller" (FI), de la Universidad Autónoma de Tamaulipas que comprende prensa manual, máquina de abrasión de los Ángeles, báscula electrónica, horno, juego de tamices,

cono de Abrams, olla Washington,, moldes cilíndricos, y termómetro digital, con el fin de elaborar probetas de asfaltos, y obtención de esfuerzos de las mismas, utilizando pruebas destructivas, a fin de elaborar un concreto apropiado y eficaz.

Figura 2

Calle de estudio



Fuente: elaboración propia.

Metodología

“Las investigaciones descriptivas constituyen una mera descripción de algunos fenómenos” (Cazau, 2006). En este estudio se seleccionan conceptos, variables y cada una se mide como independiente de la otra. La investigación experimental es cualquier investigación realizada con un enfoque científico, donde un conjunto de variables se mantiene constante, mientras que el otro conjunto de variables se mide como sujeto del experimento. En la presente investigación las variables que se mantienen constantes son las propiedades del cemento, en cambio las variables que son subjetivas son las propiedades de los residuos de construcción usados como agregados. “Las técnicas experimentales deben contrastarse o convalidarse teórica y empírica o experimentalmente”, de una forma experimental porque pueden no llegar a funcionar, y teóricamente porque, aunque funcionen, puede deberse a alguna causa distinta.

Enfoque de investigación

El enfoque metodológico es mixto, porque la investigación busca calcular, medir, y exponer los datos que se obtienen de los valores obtenidos, apoyándose así mismo con los indicadores de las variables a comparar.

Figura 3

Concreto hidráulico hecho en obra



Fuente: elaboración propia.

Figura 4

Concreto premezclado



Fuente: elaboración propia.

Tipos de investigación

Por su nivel de explicación, la investigación se considera descriptiva, ya que se elaboran concretos en laboratorio mediante agregados con residuos y se analizan las propiedades mecánicas y físicas de los concretos elaborados en plazos de 7,14 y 28 días.

Figura 5

Agregados pétreos



Fuente: elaboración propia.

Métodos de investigación

Los métodos de investigación conllevan procedimientos prácticos, con el objeto y los medios de investigación que permiten revelar las características fundamentales, y relaciones esenciales del objeto que son accesibles a la contemplación sensorial. En la presente investigación se aplica un método experimental, ya que se manipulan una o más variables para poder controlar el aumento, o en su caso, la disminución de dichas variables. En otras palabras, un estudio experimental consiste en hacer un cambio en el valor de una variable (variable o independiente), para observar su efecto en otra variable (variable dependiente).

Una metodología experimental se basa en:

Generar una manipulación

Se modifica la variable independiente y observamos los cambios.

Generar una orientación al futuro

En la investigación se cambian los agregados tradicionales como grava, arena, por agregados generados por residuos de la construcción, para analizar su resistencia a compresión, por medio de cilindros ensayados en la máquina universal a 7, 14, y 28 días. Al analizar lo obtenido en la metodología experimental, se quiere:

- Promover que sean cambiados los agregados tradicionales, por agregados generados por los residuos de construcción.
- Generar una orientación al futuro, para saber dónde usar el concreto generado por agregados de residuos en la construcción, según sea la resistencia obtenida.

Variables de estudio

Propiedades del concreto: características físicas del concreto que pueden presentarse ya sea en su estado fresco o endurecido, tales como la trabajabilidad, cohesividad, resistencia y durabilidad.

Residuos de construcción: materiales, productos, o subproductos generados durante las actividades de excavación, demolición, ampliación, remodelación, modificación en construcción, tanto pública como privada.

Definiciones operacionales

Propiedades del concreto

Realizar ensayos a compresión en probetas cilíndricas de 4 x 8 pulgadas (100 x 200 mm), a 7, 14 y 28 días respectivamente, en prensa manual digital para ensaye a compresión, con un alcance de medición 120 toneladas.

Ejecutar ensayos de revenimiento a las mezclas de concreto realizadas en el laboratorio de materiales, midiendo la diferencia de alturas que existe del punto más alto del molde cónico (cono de Abrams), hasta el punto más alto de la mezcla después de ser retirado el molde.

Residuos de construcción

Tomar muestras de escombros producto de demolición de losa, aproximadamente 30 kg. Separar los materiales, hasta obtener únicamente concreto reciclado, conformado por mortero y agregados. En laboratorio someter a una reducción de volumen el material recaudado.

Figura 6

Residuos de construcción



Fuente: elaboración propia.

Figura 7

Desechos por desastres naturales



Fuente: elaboración propia.

Figura 8

Ensayo a compresión de cilindros



Fuente: elaboración propia.

Figura 9

Planta recicladora de concreto



Fuente: elaboración propia.

Figura 10

Reducción del escombro



Fuente: elaboración propia.

Figura 11

Prueba de revenimiento



Fuente: elaboración propia.

Figura 12

Ensayo a compresión de cilindros



Fuente: elaboración propia.

Figura 13

Disposición de muestra de agregado grueso



Fuente: elaboración propia.

Figura 14

Deposición de esferas



Fuente: elaboración propia.

Cuadro de operacionalización

Tabla 1

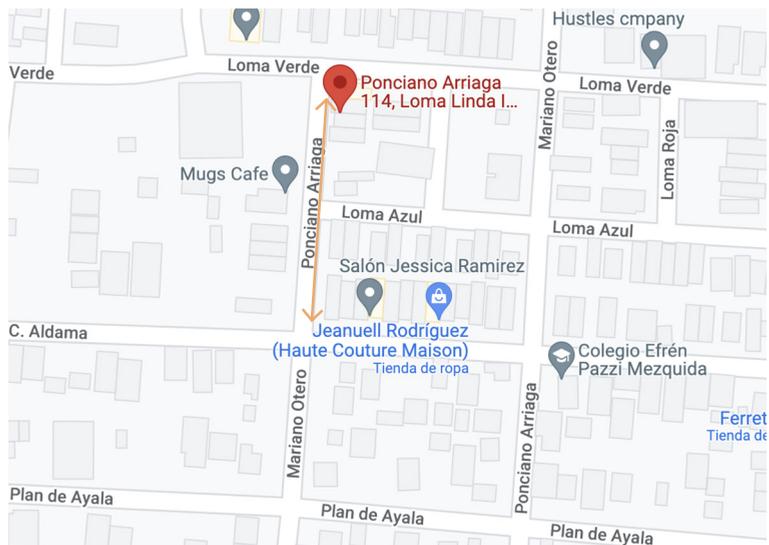
Cuadro de operacionalización

| Variables | Dimensiones | |
|--------------------------|----------------------|------------------|
| Propiedades del concreto | 1. Estado fresco | Trabajabilidad |
| | | Cohesividad |
| Residuos de construcción | 2. Estado endurecido | Resistencia |
| | | 1. Clasificación | Tipo |
| | | Volumen |
| | | Material |
| | 2. Agregado grueso | Granulometría |

Fuente: elaboración propia.

Figura 15

Población de estudio



Fuente: elaboración propia.

Muestra

La muestra es un conjunto de desechos de obra producidos en la dirección citada (Figura 15), tomando como muestra los escombros producto de demolición de las vialidades antes mencionadas (Figura 16), utilizando el método de muestreo no probabilístico de “conveniencia”, con el motivo de estudiar específicamente los restos de losa, con un tamaño de muestra de aproximadamente 30 kg.

Figura 16

Muestra de estudio



Fuente: elaboración propia.

Instrumentos de recolección de datos

Máquina de abrasión los Ángeles

Está constituida por un cilindro de acero, hueco y cerrado en ambos extremos, con diámetro interior de 710 ± 5 mm y largo de 510 ± 5 mm, montado sobre dos soportes ubicados al centro de sus caras paralelas, que le permiten girar sobre su eje de simetría en posición horizontal con una velocidad angular de 30 a 33 rpm.

El cilindro tiene una abertura que permite introducir la muestra de prueba y las esferas metálicas, con una tapa de cierre hermético diseñada con la misma curvatura del cilindro para que la superficie interior del mismo sea continua y uniforme; además tiene en su parte interior una placa de acero removible de 2.5 cm (1”) de espesor, que se proyecte radialmente 8.9 cm ($3\frac{1}{2}$ ”) en toda la longitud del cilindro y cuenta con un dispositivo para registrar el número de revoluciones que dé el cilindro (ver Figura 17).

Figura 17

Tamiz



Fuente: elaboración propia.

Este instrumento fue elegido para recolectar datos y determinar la resistencia a la trituración o abrasión de los materiales pétreos utilizados en las mezclas asfálticas (Normas: N·CMT·4·04, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas).

Figura 18

Prensa manual digital



Fuente: elaboración propia.

Tamices

Los tamices de laboratorio filtran, tanto en malla de acero inoxidable como en chapa perforada, redonda, cuadrada o ranurada, se fabrican cumpliendo rigurosamente con las normativas nacionales e internacionales UNE, ISO, ASTM, AFNOR, BS, etcétera. También se pueden montar con malla de nylon (ver Figura 18).

Normas:

- Normas: N-CMT-1-01
- Normas: N-CMT-1-02
- Normas: N-CMT-1-03

Este instrumento fue elegido para conocer la granulometría de los materiales con los que se realizan las muestras y ensayos para la recolección de datos.

Prensa manual digital

Es utilizada y construida para satisfacer los requerimientos de los usuarios que necesitan ensayar la resistencia de materiales en obra o en laboratorio. La prensa manual digital para ensaye a compresión tiene un alcance de medición 120 toneladas; el manómetro Noshok con resolución de 10 kgf, mide la retención de carga máxima y unidad de medición kgf, cumpliendo por tanto las Normas Internacionales: ASTM C39 y AASHTO T22.

Figura 19

Horno de laboratorio



Fuente: Elaboración propia.

Las características de esta serie son su robustez, precisión de medida, sencillez de manejo, comodidad para transportar, y la conformidad con las normativas vigentes. Su rígida estructura, gracias al marco ensamblado sin soldadura, asegura una perfecta repetibilidad y precisión de los resultados de ensayo (ver Figura 19).

Este instrumento fue elegido para obtener las resistencias de las muestras creadas en el laboratorio de materiales.

Horno

Usado para deshidratar reactivos de laboratorio o secar instrumentos, el horno aumenta temperatura gradualmente conforme pasa el tiempo, o según sea su programación. Cuando la temperatura sea la óptima y se estabilice mantendrá su temperatura, en caso de descender la temperatura activará las resistencias para obtener la temperatura programada (ver Figura 19). El horno de secado cumple con las normas N-CMT-1-01, N-CMT-1-02, N-CMT-1-03.

Figura 20

Cono Abrams



Fuente: elaboración propia.

Cono slump o Abrams

Utilizado para el ensayo al concreto en estado fresco, y medir su consistencia, el molde es fabricado a partir de una lámina galvanizada, cuenta con un diámetro de la base mayor de 8", y un diámetro de la base menor de 4", cumpliendo con las normas NTC 396, ASTM C143-192 (ver Figura 21).

Figura 21
Olla Washington



Fuente: elaboración propia.

Olla Washington

Utilizada para pruebas al concreto fresco, determinando el contenido de aire en una mezcla de concreto, observando el cambio de volumen al aplicar presión. La cantidad de aire se lee en el manómetro como un porcentaje de aire atrapado en el concreto, cumpliendo con la norma ASTM C173 (ver Figura 22).

Figura 22
Báscula electrónica marca Torrey



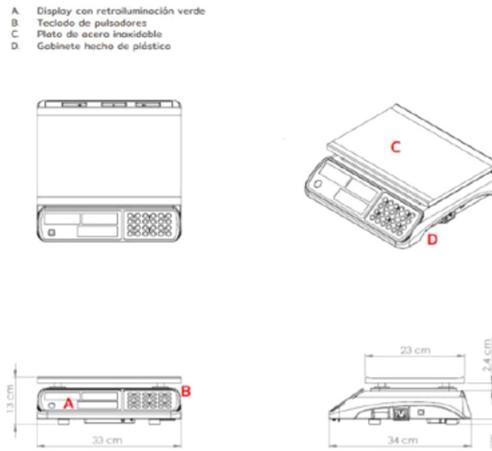
Fuente: elaboración propia.

Báscula electrónica Torrey modelo SXE-40

La báscula electrónica es usada para pesar los materiales y muestras de laboratorio (Figura 23), así como para obtener pesos volumétricos, y tamaños de muestra, cuenta con una capacidad de 40 kg, pantalla LED iluminada, batería recargable de 100 horas de duración, hecha a base de material plástico, con un plato de 33 cm x 23 cm en aluminio, y un peso neto de 2.72 kg (ver Figura 24 para detalles y dimensiones).

Figura 23

Detalles y dimensiones de báscula electrónica



Fuente: elaboración propia.

Figura 24

Moldes cilíndricos para concreto



Fuente: elaboración propia.

Moldes cilíndricos para concreto

Utilizados para formar probetas cilíndricas de concretos en pruebas de compresión fabricados en acero, cuentan con un diámetro de 4” y una altura de 8”, cumplen con las normas INV E 402, ASTM C39, NTC 504, NTC 673 (Figura 25).

Figura 25

Termómetro digital



Fuente: elaboración propia.

Termómetro digital

Utilizado para determinar la temperatura del concreto en estado fresco, cuenta con dimensiones de 24.5 cm x 2 cm x 2 cm, cuenta con una longitud de sonda de 15 cm, pesa aproximadamente 20 gr, comprende un rango de medición de -50 °C a 300 °C, y un rango de precisión de +/- 0.1 °C (ver Figura 26).

Figura 26

Granulometría de los agregados



Fuente: elaboración propia.

Métodos de análisis de los datos

Para el análisis de datos cuantitativos recaudados se utilizarán los métodos aritméticos, media aritmética, y media de tendencia central. La media aritmética será utilizada para analizar los datos recaudados en el laboratorio de materiales, se efectuará un “*n*” número de ensayos por prueba de material, realizando un promedio de cada uno de ellos obteniendo un único dato final. La media de tendencia central será ocupada para analizar los datos obtenidos en las pruebas de compresión a las muestras cilíndricas de concreto, y verificar que cumplan con los atributos necesarios, ubicando los valores dentro de una escala de medición de las variables.

Resultados

Se presentan los resultados de los ensayos realizados a los agregados y al concreto, tanto en su muestra patrón, como a la muestra con concreto reciclado, en su estado fresco y endurecido; en tablas, cuadros y gráficas que permiten evaluar el uso del concreto reciclado como un agregado grueso en la elaboración de concreto hidráulico. Para ello, es de suma importancia conocer las propiedades físicas de cada uno de los componentes que conforman este concreto.

Cemento

Tabla 2

Propiedades del cemento CEMEX Extra

| Especificaciones mecánicas | Método de prueba | Resultados | Unidades | Condición de resultado |
|------------------------------------|------------------|------------|-------------------|------------------------|
| Resistencia a compresión a 3 días | NMX-C-061 | 20 | N/mm ² | Valor mínimo esperado |
| Resistencia a compresión a 28 días | NMX-C-061 | 30 | N/mm ² | Valor mínimo esperado |
| Tiempo de fraguado inicial | NMX-C-059 | 45 | Minutos | Valor mínimo esperado |
| Tiempo de fraguado final | NMX-C-059 | 600 | Minutos | Valor mínimo esperado |
| Expansión de autoclave | NMX-C-062 | 0.8 | % | Valor mínimo esperado |
| Contracción en autoclave | NMX-C-062 | 0.2 | % | Valor mínimo esperado |

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 2 se observa que las propiedades mecánicas y físicas del cemento cumplen la norma mexicana NMX-C 414-ONNCCE.

Agua

Para la elaboración de la mezcla del concreto, se emplea agua sin impurezas que cuenta con un peso específico de 1 g/cm^3 , siendo dicho valor el utilizado para el desarrollo del diseño de la mezcla.

Diseño de mezcla

Ya conocidas las propiedades de los materiales que serán empleados en la elaboración del concreto, tanto en su muestra patrón, como de agregado reciclado, se realiza el diseño de mezclas por el método ACI.

Tabla 3

Granulometría del agregado grueso

| Tamiz | Abertura (mm) | W retenido (g) | % retenido | Retenido acumulado % | % pasa | N-CMT-2-02-002-19 |
|-----------------------|---------------|----------------|------------|----------------------|--------|-------------------|
| 2" | 50.8 | 0 | 0 | | 100 | 0 |
| 1" | 25.49 | 20 | 0.22 | 0.22 | 99.78 | 0-5 |
| 3/4" | 19.1 | 1076 | 11.71 | 11.93 | 88.07 | 0-10 |
| 1/2" | 12.7 | 4215 | 45.87 | 57.79 | 42.21 | 40-70 |
| 3/8" | 9.52 | 1870 | 20.35 | 78.14 | 21.86 | 85-100 |
| #4 | 4.75 | 1522 | 16.56 | 94.7 | 5.3 | 90-100 |
| #8 | 2.38 | 178 | 1.94 | 96.64 | 3.36 | 95-100 |
| #16 | 1.19 | 309 | 3.36 | 100.00 | 0 | - |
| Sumatoria | | 9190 | 100.00 | | | |
| Tamaño máximo nominal | | 3/4 | | | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4

Granulometría del agregado grueso (concreto reciclado)

| Tamiz | Abertura (mm) | W retenido (g) | % retenido | Retenido acumulado % | % pasa | N-CMT-2-02-002-19 |
|-------|---------------|----------------|------------|----------------------|--------|-------------------|
| 2" | 50.8 | 0 | 0.00 | - | 100.00 | - |
| 1" | 25.49 | - | 0.00 | - | 100.00 | - |
| 3/4" | 19.1 | 260 | 5.24 | 5.24 | 94.76 | 0-10 |

| Tamiz | Abertura (mm) | W retenido (g) | % retenido | Retenido acumulado % | % pasa | N-CMT-2-02-002-19 |
|--------------------------|------------------|-------------------|---------------|-------------------------|--------|-------------------|
| 1/2" | 12.7 | 944 | 19.01 | 24.25 | 75.75 | 45-60 |
| 3/8" | 9.52 | 1148 | 23.12 | 47.37 | 52.63 | 45-80 |
| #4 | 4.75 | 1520 | 30.61 | 77.99 | 22.01 | 90-100 |
| #8 | 2.38 | 722 | 14.54 | 92.53 | 7.47 | 95-100 |
| #16 | 1.19 | 371 | 7.47 | 100.00 | 0.00 | - |
| Sumatoria | | 4965 | 100.00 | | | |
| Tamaño máximo nominal | | 3/4" | | | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5

Granulometría del agregado fino

| Tamiz | Abertura (mm) | W retenido (g) | % retenido | Retenido acumulado % | % pasa | N-CMT-2-02-002-19 |
|--------------------------|------------------|-------------------|---------------|-------------------------|--------|-------------------|
| 3/8" | 9.52 | 17.6 | 2.13 | 2.13 | 97.87 | 0 |
| 4 | 4.75 | 32.1 | 3.88 | 6.01 | 93.99 | 0-5 |
| 8 | 2.38 | 48.7 | 5.88 | 11.89 | 88.11 | 0-20 |
| 16 | 1.19 | 68.5 | 8.28 | 20.17 | 79.83 | 15-20 |
| 30 | 0.6 | 181.3 | 21.91 | 42.08 | 57.93 | 40-75 |
| 50 | 0.3 | 349.9 | 42.28 | 84.36 | 15.65 | 70-90 |
| 100 | 0.15 | 72.3 | 8.74 | 93.09 | 6.91 | 90-98 |
| P#100 | 0.08 | 57.2 | 6.91 | 100.00 | 0.00 | - |
| Sumatoria | | 827.6 | 100.00 | | | |
| Modulo de finura | | 2.6 | | | | |
| Tamaño máximo nominal | | #4 | | | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6*Resultados de desgaste del agregado grueso con grava triturada*

| Masa inicial (gr) 3/4" - 1/2" | Masa inicial (gr) 1/2" - 3/8" | Masa inicial total (gr) | Peso sin lavar (gr) | Desgaste preliminar | Peso material lavado | Desgaste final |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|
| 2500 | 2500 | 5000 | 3660 | 27 % | 3610 | 28 % |
| Peso de esferas | 4580 gr | | | | | |
| Revoluciones | 500 | | | | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7*Resultados de desgaste del agregado grueso con concreto reciclado*

| Masa inicial (gr) 3/4" - 1/2" | Masa inicial (gr) 1/2" - 3/8" | Masa inicial total (gr) | Peso sin lavar (gr) | Desgaste preliminar | Peso material lavado | Desgaste final |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|
| 2500 | 2500 | 5000 | 3585 | 28 % | 3515 | 30 % |
| Peso de esferas | 4580 gr | | | | | |
| Revoluciones | 500 | | | | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8*Resultados de porcentaje de humedad y absorción de los agregados*

| Propiedades físicas | Agregado fino (Arena) | Agregado grueso (Grava y triturada) | Agregado grueso (Concreto reciclado) |
|----------------------|--------------------------|--|---|
| Contenido de humedad | 2.13 % | 0.50 % | 1.43 % |
| Absorción | 3.01 % | 0.75 % | 8.59 % |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9*Resultados de pesos específicos*

| Agregados | Peso específico |
|---------------------------|-------------------------|
| Agregado fino | 2.51 gr/cm ² |
| Agregado grueso | 2.62 gr/cm ² |
| Agregado grueso reciclado | 2.27 gr/cm ² |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10*Pesos volumétricos de los agregados pétreos*

| Agregados | Peso volumétrico seco varillado | Peso volumétrico seco suelto |
|---------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Agregado fino | 1505.766 kg/m ³ | 1417.628 kg/m ³ |
| Agregado grueso | 1540.282 kg/m ³ | 1431.338 kg/m ³ |
| Agregado grueso reciclado | 1267.606 kg/m ³ | 1185.211 kg/m ³ |

Fuente: elaboración propia.

Muestra patrón

El resumen de las características físicas de los materiales a emplearse en el diseño de la mezcla patrón, se muestra en la Tabla 11, así como los resultados de los valores de diseño de mezcla en estado seco, y por corrección de humedad se muestran en las Tablas 12 y 13 respectivamente.

Tabla 11*Características de los materiales empleados en la mezcla*

| Dato | Arena (agregado fino) | Agregado grueso (Grava triturada) | Unidad |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Peso específico | 2.213 | 2.624 | gr/cm ³ |
| Módulo de finura | 2.6 | - | - |
| Humedad | 2.125 | 0.5 | % |
| Absorción | 3.01 | 0.75 | % |
| Peso volumétrico seco varillado | 1505.766 | 1540 | kg/m ³ |

| Dato | Arena (agregado fino) | Agregado grueso (Grava triturada) | Unidad |
|-----------------|--------------------------|--------------------------------------|--------|
| PE. del cemento | - | 3/4 | in |
| PE. del cemento | 3.15 gr/cm ³ | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12

Valores de diseño de la mezcla en seco

| Material | Cantidad | Unidad |
|----------------------|----------|-------------------|
| Cemento | 410 | kg/m ³ |
| Agua | 205 | L/m ³ |
| Agregado fino seco | 675.997 | kg/m ³ |
| Agregado grueso seco | 985.78 | kg/m ³ |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 13

Valores de diseño de la mezcla corregidos por humedad

| Material | Cantidad | Unidad |
|------------------------|----------|-------------------|
| Cemento | 410 | kg/m ³ |
| Agua efectiva | 218 | L/m ³ |
| Agregado fino húmedo | 690 | kg/m ³ |
| Agregado grueso húmedo | 986 | kg/m ³ |

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se muestran los resultados de la dosificación de materiales obtenida en el diseño de mezcla, realizado para un total de 9 especímenes con un volumen unitario de 0.00157 m³, y un volumen total de 0.0141 m³. La dosificación de material para la mezcla de concreto se determina a través de la cantidad de peso de material por kilogramo por metro cúbico, y la cantidad de volumen que se desee obtener (probetas cilíndricas), adicionando un 5% de desperdicio. Los resultados obtenidos de la dosificación de la mezcla se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14*Dosificación de los materiales para muestra patrón*

| Material | Peso de material kg/m ³ | Volumen de cilindros m ³ | Cantidad de material preliminar | Cantidad de material con 5% de desperdicio adicional | Unidad |
|-----------------|---------------------------------------|--|------------------------------------|---|--------|
| Cemento | 410 | 0.0141 | 5.781 | 6.07 | kg |
| Agua efectiva | 218 | 0.0141 | 3.074 | 3.227 | L |
| Agregado fino | 690 | 0.0141 | 9.729 | 10.215 | kg |
| Agregado grueso | 986 | 0.0141 | 13.903 | 14.598 | kg |

Fuente: elaboración propia.

Muestra con concreto reciclado

El resumen de las características físicas de los materiales a emplearse en el diseño de la mezcla con concreto reciclado se muestra en la Tabla 15, así como los resultados de los valores de diseño de mezcla en estado seco, y por corrección de humedad se muestran en las Tablas 16 y 17 respectivamente.

Tabla 15*Características de los materiales empleados en la mezcla*

| Dato | Arena (Agregado fino) | Agregado grueso (Gravita triturada) | Unidad |
|---------------------------------|--------------------------|--|--------------------|
| Peso específico | 2.213 | 2.269 | gr/cm ³ |
| Módulo de finura | 2.6 | - | - |
| Humedad | 2.125 | 1.434 | % |
| Absorción | 3.01 | 8.597 | % |
| Peso volumétrico seco varillado | 1505.766 | 1267.606 | kg/m ³ |
| Tamaño máximo nominal | - | 3/4 | in |
| PE del cemento | 3.15 | gr/cm ³ | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16*Valores de diseño de la mezcla en seco*

| Material | Cantidad | Unidad |
|----------------------|----------|-------------------|
| Cemento | 410 | kg/m ³ |
| Agua | 205 | L/m ³ |
| Agregado fino seco | 721.231 | kg/m ³ |
| Agregado grueso seco | 811.268 | kg/m ³ |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 17*Valores de diseño de la mezcla corregidos por humedad*

| Material | Cantidad | Unidad |
|----------------------|----------|-------------------|
| Cemento | 410 | kg/m ³ |
| Agua | 269 | L/m ³ |
| Agregado fino seco | 737 | kg/m ³ |
| Agregado grueso seco | 823 | kg/m ³ |

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 18 se muestran los resultados de la dosificación de materiales obtenida en el diseño de mezcla, realizado para un total de 9 especímenes con un volumen unitario de 0.00157 m³, y un volumen total de 0.0141 m³.

Tabla 18*Dosificación de los materiales para muestra con concreto reciclado*

| Material | Peso de material kg/m ³ | Volumen de cilindros m ³ | Cantidad de material preliminar | Cantidad de material con 5% de desperdicio adicional | Unidad |
|-----------------|---------------------------------------|--|------------------------------------|--|--------|
| Cemento | 410 | 0.0141 | 5.781 | 6.070 | kg |
| Agua | 269 | 0.0141 | 3.793 | 3.983 | L |
| Agregado fino | 737 | 0.0141 | 10.392 | 10.911 | kg |
| Agregado grueso | 823 | 0.0141 | 11.604 | 12.185 | kg |

Fuente: elaboración propia.

Resultados de las propiedades físicas del concreto (muestra patrón, y muestra con concreto realizado)

Después de los datos obtenidos en la caracterización de los agregados, así como los resultados obtenidos en la dosificación de los materiales resultantes del diseño de mezcla, es preciso evaluar el concreto en su estado fresco y endurecido, conociendo sus propiedades físicas. Las evaluaciones realizadas al concreto en estado fresco son las siguientes:

- Revenimiento
- Temperatura
- Peso volumétrico
- Contenido de aire por el método de la presión

Revenimiento

El método más utilizado para medir el revenimiento es mediante el cono de Abrams, método utilizado en la muestra de estudio de la presente investigación, siguiendo el método de muestreo que indica el manual M-MMP-2-02- 056 Revenimiento del concreto fresco (ver Figura 27).

Figura 27

Prueba de revenimiento



Fuente: elaboración propia.

Temperatura a la mezcla

La temperatura en el concreto es dada gracias al aporte de calor que entrega cada uno de los materiales agregados a la mezcla, de igual manera por el calor que produce la hidratación del cemento, por el mezclado de esta, y según sea la temperatura ambiente, la temperatura es determinada mediante un termómetro digital, procurando se encuentre entre 2" y 3" por debajo de la superficie de la mezcla, tal como se muestra en la Figura 28.

Figura 28

Obtención de temperatura de la mezcla



Fuente: elaboración propia.

Peso volumétrico

El peso volumétrico del concreto en estado fresco es el peso del concreto sobre la unidad de volumen, determinado mediante una tara con un volumen fijo, tal como lo describe el manual M-MMP-2-02-053 Características del concreto con inclusor de aire (ver Figura 29).

Figura 29

Determinación de peso volumétrico de la mezcla



Fuente: elaboración propia.

Figura 30

Determinación de contenido de aire en la mezcla de concreto fresco



Fuente: elaboración propia.

Contenido de aire

Lo que se busca en el ensayo, es obtener el contenido de aire en la mezcla de concreto fresco, a través de la variación de volumen del concreto por un cambio de presión como se muestra en la Figura 30.

Los resultados de las pruebas realizadas al concreto en su estado fresco, ejecutadas a la mezcla patrón y a la mezcla con concreto reciclado, y llevadas a cabo en el laboratorio de materiales de la UAT campus Tampico, se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19

Resultados de las características físicas del concreto en estado fresco

| Característica física | Concreto muestra patrón | Concreto muestra con concreto reciclado | Unidad |
|---|-------------------------|---|-------------------|
| Revenimiento | 10 | 7 | Cm |
| Temperatura | 30.6 | 30.3 | °C |
| Peso volumetrico | 2297.183 | 2249.29 | kg/m ³ |
| Contenido de aire por el método de la presión | 3 | 4 | % |

Fuente: elaboración propia.

Con los resultados obtenidos y expuestos en la Tabla 19, y con base en la norma NCMT-2-02-005, Calidad del concreto hidráulico, se concluye que, el revenimiento de las dos mezclas posee una consistencia media, ya que está comprendido entre los valores de 5 a 10, según la norma antes mencionada (ver Tabla 20)

Tabla 20

Valor nominal y tolerancia para el revestimiento

| Revenimiento | Tolerancia | Constancia |
|-----------------------------|------------|------------|
| Menor de 5 ⁽¹⁾ | ± 1.5 | Baja |
| Entre 5 y 10 ⁽²⁾ | ± 2.5 | Media |
| Mayor de 10 ⁽³⁾ | ± 3.5 | Alta |

Fuente: elaboración propia.

El aire se encuentra con un contenido ligero, ya que los resultados del análisis de la muestra patrón, y la muestra con concreto reciclado, arrojan un 3% y 4% respectivamente, según lo estipulado en la Norma CMT-2-02-005 Calidad del concreto hidráulico (ver Tabla 21).

Tabla 21

Contenido total del aire según el tamaño total del agregado

| Tamaño nominal del agregado mm | Contenido total de aire recomendado según tipo de exposición % | | |
|--------------------------------|--|---------|--------|
| | Ligero | Mediano | Severo |
| 75 | 1.5 | 3.5 | 4.5 |
| 80 | 2.0 | 4.0 | 5.0 |
| 40 | 2.5 | 4.5 | 5.5 |
| 25 | 3.0 | 4.5 | 6.0 |
| 20 | 3.5 | 5.0 | 6.0 |
| 13 | 4.0 | 5.5 | 7.0 |
| 10 | 4.5 | 6.0 | 7.5 |

Fuente: elaboración propia.

Resistencia a la compresión de las probetas ensayadas a los 7, 14 y 28 días

Los resultados de los ensayos a compresión de las probetas a los 7, 14 y 28 días son los siguientes:

Tabla 22

Resultados de la resistencia a la compresión de las probetas ensayadas a los 7, 14 y 28 días, en muestra patrón

| Probeta número | Clave de identificación | Fc de proyecto kg/cm ² | Fecha colado | Fecha rotura | Edad (Días) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Área (cm ²) | Carga (kg) | Resistencia kg/cm ² | Resistencia (%) | Resistencia promedio |
|----------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|---------------|-------------------------|------------|--------------------------------|-----------------|----------------------|
| 1 | P-1 | 250 | 17/06/21 | 24/06/21 | 7 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 11880 | 151.262 | 60.50 | |
| 2 | P-2 | 250 | 18/06/201 | 24/06/21 | 7 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 14751 | 187.818 | 75.13 | 166.13 |
| 3 | P-3 | 250 | 19/06/21 | 24/06/21 | 7 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 12513 | 159.322 | 63.73 | |
| 4 | P-4 | 250 | 20/06/21 | 01/07/21 | 14 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 16731 | 213.028 | 85.21 | |
| 5 | P-5 | 250 | 21/06/21 | 01/07/21 | 14 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 17028 | 216.809 | 86.72 | 212.19 |
| 6 | P-6 | 250 | 22/06/21 | 01/07/21 | 14 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 16236 | 206.725 | 82.69 | |

| Probeta número | Clave de identificación | F _c de proyecto kg/cm ² | Fecha colado | Fecha rotura | Edad (Días) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Área (cm ²) | Carga (kg) | Resistencia kg/cm ² | Resistencia (%) | Resistencia promedio |
|----------------|-------------------------|---|--------------|--------------|-------------|-------------|---------------|-------------------------|------------|--------------------------------|-----------------|----------------------|
| 7 | P-7 | 250 | 23/06/21 | 12/07/21 | 28 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 19503 | 248.322 | 99.33 | |
| 8 | P-8 | 250 | 24/06/21 | 12/07/21 | 28 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 20097 | 255.886 | 102.35 | 250.42 |
| 9 | P-9 | 250 | 25/06/21 | 12/07/21 | 28 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 19404 | 247.062 | 98.82 | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 23

Resultados de la resistencia a la compresión de las probetas ensayadas a los 7, 14 y 28 días, en muestra de concreto reciclado

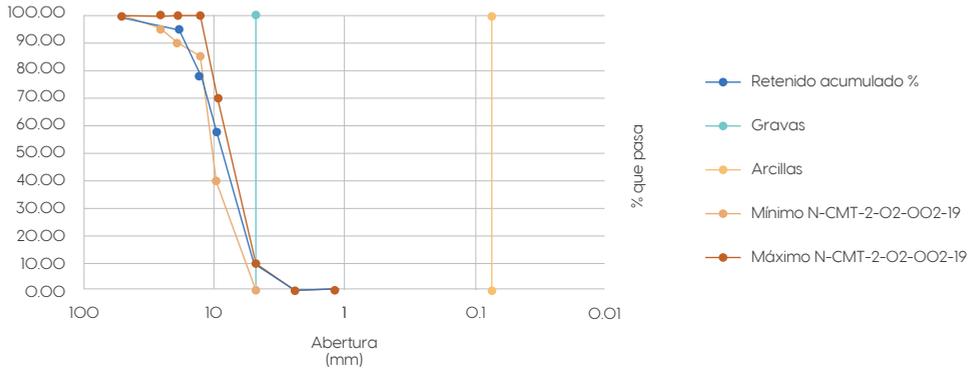
| Probeta número | Clave de identificación | F _c de proyecto kg/cm ² | Fecha colado | Fecha rotura | Edad (Días) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | Área (cm ²) | Carga (kg) | Resistencia kg/cm ² | Resistencia (%) | Resistencia promedio |
|----------------|-------------------------|---|--------------|--------------|-------------|-------------|---------------|-------------------------|------------|--------------------------------|-----------------|----------------------|
| 1 | P-1 | 250 | 17/06/21 | 24/06/21 | 7 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 11880 | 141.076 | 56.43 | |
| 2 | P-2 | 250 | 18/06/201 | 24/06/21 | 7 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 12672 | 161.347 | 64.54 | 150.39 |
| 3 | P-3 | 250 | 19/06/21 | 24/06/21 | 7 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 11682 | 148.741 | 59.5 | |
| 4 | P-4 | 250 | 20/06/21 | 01/07/21 | 14 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 14652 | 186.557 | 74.62 | |
| 5 | P-5 | 250 | 21/06/21 | 01/07/21 | 14 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 15543 | 197.902 | 79.16 | 193.63 |
| 6 | P-6 | 250 | 22/06/21 | 01/07/21 | 14 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 15428 | 196.437 | 78.57 | |
| 7 | P-7 | 250 | 23/06/21 | 12/07/21 | 28 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 16929 | 215.549 | 86.22 | |
| 8 | P-8 | 250 | 24/06/21 | 12/07/21 | 28 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 16731 | 213.028 | 85.21 | 212.19 |
| 9 | P-9 | 250 | 25/06/21 | 12/07/21 | 28 | 20.32 | 10.16 | 78.539 | 16335 | 207.986 | 83.19 | |

Fuente: elaboración propia.

En las Tablas 22 y 23, se muestran los resultados de los ensayos a compresión a las probetas a los 7, 14 y 28 días, tanto en la muestra patrón como en la muestra con concreto reciclado. La variación de resistencias es notable, siendo la muestra con concreto reciclable la que incumple con la resistencia esperada de proyecto a los 28 días, con solo el 84.8% de la resistencia. A continuación, se muestran las gráficas de comparación resistencia-tiempo, de los ensayos realizados (ver Gráfica 1).

Gráfica 1

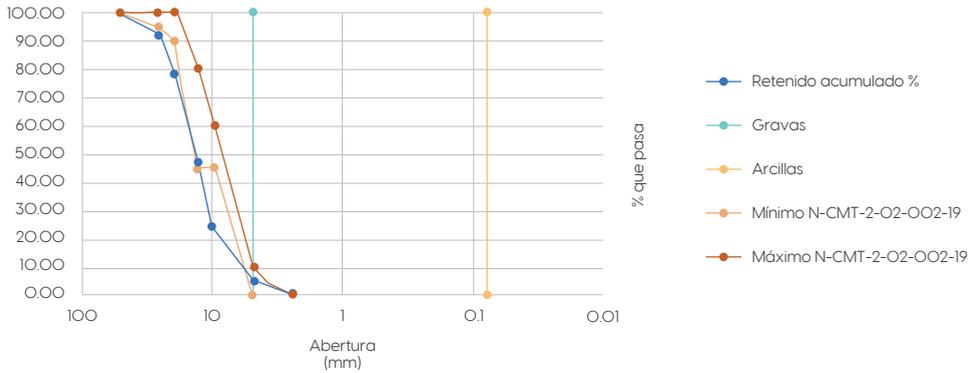
Curva granulométrica del agregado grueso



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 2

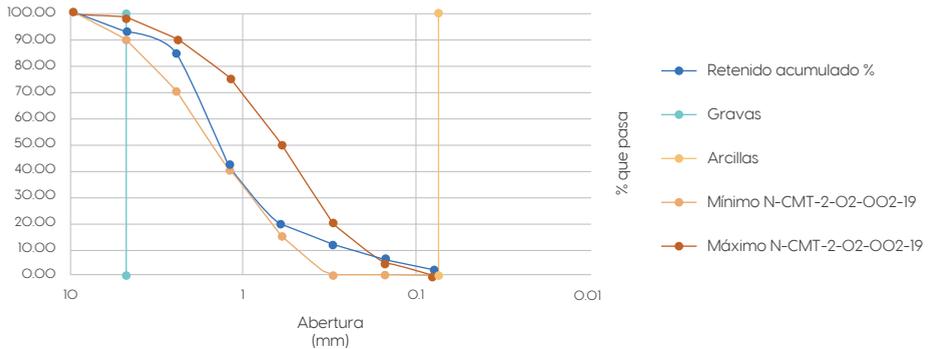
Curva granulométrica del agregado grueso (concreto reciclado)



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 3

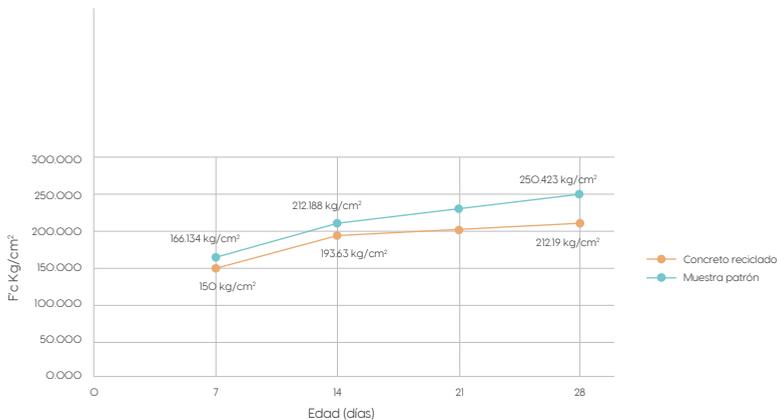
Curva granulométrica del agregado fino



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 4

Edad contra resistencia de los 7, 14, y 28 días



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

La granulometría del agregado grueso en grava triturada cumple casi en su totalidad con los valores máximos y mínimos establecidos en la norma N-CMT-2-02-002-19 Calidad de los agregados pétreos para concreto hidráulico, donde solamente se encontraron 20 gramos de material de una pulgada, siendo el tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ ", y el agregado de $\frac{3}{4}$ " sobrepasa por 1.93 % el límite granulométrico

establecido. La norma antes mencionada establece que se les deberá dar algún tratamiento para que cumplan con dichos límites.

Con los datos obtenidos y expuestos en la Tabla 4 de la granulometría del agregado grueso con concreto reciclado, se llegó a la conclusión que los porcentajes obtenidos están muy por debajo de los estándares requeridos por la norma N-CMT-2-02-002-19, cumpliendo únicamente con la granulometría de 3/8". Por lo cual deberá ser motivo de desecho como agregado grueso en mezcla de concreto hidráulico.

Se presentaron los valores de la granulometría del agregado fino (arena), la cual se encuentra casi en su totalidad dentro de los parámetros máximos y mínimos estipulados por la Norma N-CMT-2-02-002-19 inciso D, donde se puede encontrar un pequeño porcentaje de material grueso como se muestra en la curva granulométrica del Gráfico 3, por lo que el material fino, al estar dentro de los parámetros, se acepta para mezclas de concreto hidráulico.

Al realizarse la prueba de desgaste en la máquina de abrasión, la grava triturada tiende a tener una mayor resistencia al desgaste, al presentar un desgaste del 28% y el concreto reciclado un 30%, por lo que existe una diferencia del 2%.

La norma C-CMT-2-02-002 Calidad de los agregados pétreos para concreto hidráulico, determina que, "los agregados gruesos probados al desgaste tendrán una pérdida en masa del 50% como máximo", por lo anterior, los dos agregados se encuentran dentro del margen máximo permitido.

Al realizar la prueba de porcentaje de humedad y absorción, encontramos que, el concreto reciclado tiende a presentar un mayor porcentaje con respecto a su comparación, la grava triturada, debido a que, el concreto reciclado no solo está compuesto de grava triturada, y grava de canto rodado, sino que también presenta un porcentaje de mortero, por lo cual se concluye que, presenta una mayor porosidad y tiende a tener una mayor demanda de agua.

En los apartados peso específico del agregado y peso volumétrico de los agregados se presentaron los resultados de los pesos específicos de los agregados, y según lo expuesto, el agregado proveniente del concreto reciclado, cuenta con valores por debajo del agregado fino y la grava triturada, por lo cual, nuevamente, el concreto reciclado tiene un porcentaje de porosidad, con un alto valor de contenido de aire, aunque cumple con lo estipulado en la Norma N-CMT-2-02-002-19 Calidad de agregados pétreos para concreto hidráulico, donde su valor mínimo de masa volumétrica varillada no debe de estar por debajo de los 1120 kg/m³.

En el diseño de mezclas las proporciones en peso fueron de 1: 1.68: 2.40: 26.585 l/bolsa, para el concreto de muestra patrón, y 1: 1.80: 2.01: 31.83 l/bolsa, en la muestra con concreto reciclado, por lo cual se concluye que, al presentar un

alto porcentaje de absorción y humedad, el agua a emplearse en las mezclas será mayor, lo que provoca una alta relación agua-cemento.

Las mezclas cuentan con un revenimiento de 10 y 7 cm y entran en la categoría de consistencia media, según la Norma N-CMT-2-02-005, lo que indica que tendrá una buena manejabilidad.

Las temperaturas registradas de las mezclas fueron 30.3 °C y 30.6 °C. La Norma CMT-2- 02-005 Calidad del concreto hidráulico, en el apartado D.3.3, estipula que, “en climas cálidos, la temperatura máxima del concreto en el momento de la producción y colocación no excederá de treinta y dos (32) grados Celsius”, por lo cual las mezclas cumplen normativamente respecto a las temperaturas.

De acuerdo con los ensayos a compresión realizados a 7, 14 y 28 días a las muestras, se llega a la conclusión que, la muestra con concreto reciclado no cumple con la resistencia esperada de proyecto de 250 kg/cm² que equivale al 100% de la resistencia a los 28 días, presentando 60.16%, 77%, y finalmente el 84.88% a los 28 días del colado. Por el contrario, la muestra patrón cumple con la resistencia esperada a los 28 días, arrojando el 100.16% equivalente a 250.42 kg/cm².

Referencias

- Aguilar, A. (2016). *Reciclado de materiales de construcción*. España: Instituto Juan de Herrera. Av. Juan de Herrera 4. 28040 MADRID. ESPAÑA. ISSN: 1578- 097X.
- Buendía L., Colas P., Hernández F. (2001). *Variables*. McGraw-Hill. Obtenido de https://www.ugr.es/~ugr_unt/Material%20M%F3dulo%201/variables.pdf Buenos Aires: Amorrortu. Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, 1-30.
- Bedoya, L. D. (2015). *El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana*. Scielo, 99-108.
- Cámara Mexicana de la Construcción. (2014). *Plan de manejo de residuos de la construcción y la demolición*. Sin ciudad: Sin editorial. 1-30.
- Castaño, J. O. (2013). *Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes*. Tecnura, 1-9.
- Castillo, I. A. (s.f.). *Tecnología del concreto*. Lima, Perú: San Marcos.
- CMIC. (2014). *Plan de manejo de residuos de la construcción y la demolición*. Obtenido de <https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Flayer/PM-RCD.htm>
- CMT. (2012). *Calidad del agua del concreto hidráulico. 1-6*. Obtenido de <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-2-02-003-02.pdf>
- _____. (2012). *Calidad de agregados*. 1-20. Obtenido de <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-2-02-002-02.pdf>
- _____. (2013). *Calidad del cemento Portland. 112*. Obtenido de <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-2-02-001-02.pdf>

- Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible (Sin Año). *Reciclado de concreto*.
Obtenido de: https://ficem.org/publicaciones-CSI/DOCUMENTO-CSI-RECICLAJE-DEL-CONCRETO/RECICLAJE-D CONCRETO_1.pdf
- ELKON, C. (s.f). ELKON. Obtenido de <http://www.concretebatchingplants.com/es/plantas-recicladoras-de-concreto>
- Ernesto, I. M. (2012). *Reciclaje de desechos de concreto y verificación de características físicas y propiedades mecánicas*. Guatemala: Sin editorial
- Gómez, R. (1993). *Escombros 1*. IPN, 250-258. Sin ciudad: sin editorial. Obtenido de: [file:///C:/Users/Pc/Downloads/parte_3.5_escombros%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Pc/Downloads/parte_3.5_escombros%20(1).pdf)

Análisis del comportamiento de la resistencia a la compresión de un concreto adicionado con ceniza de hueso seco bovino

Marcos Alfredo Azuara Hernández¹

Rodolfo Garza Flores²

Francisco Ángel Olivera Zura³

Resumen

El presente estudio tuvo como propósito analizar, si la adición de la ceniza del hueso seco bovino ocasiona un incremento en la resistencia a la compresión del concreto con respecto a un concreto patrón $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$. En esta investigación se diseñaron varias mezclas de concreto, elaboradas con cemento Portland ordinario (CPO 40) de la marca CEMEX, agregado fino del banco de materiales el Pujal y agregado grueso del banco de materiales de Triturados Palmillas. Asimismo, la ceniza del hueso seco bovino (CHSB), se obtuvo de la calcinación de los huesos de origen bovino; recolectados en los predios de la colonia Nuevo Michoacán, municipio de Pánuco, Veracruz. El diseño de mezcla para el concreto patrón y el concreto adicionado con ceniza del hueso seco bovino, se realizó a través de la metodología descrita en el ACI 211.1.

Palabras clave: ceniza, hueso seco bovino, concreto, prueba de revenimiento, resistencia a la compresión.

Antecedentes

El concreto de cemento Portland, es el material seleccionado para la construcción en una gran variedad de estructuras en el mundo, debido al bajo costo económico. Por lo tanto, no es tan impactante que todos los avances en la tecnología del concreto hayan sucedido como el resultado de dos fuerzas impulsoras, tales como la velocidad de construcción y la durabilidad del concreto (Kumar, 2000).

Calleja (1982), menciona que las cenizas son consideradas como adiciones activas al Clinker de cemento Portland, semejantes con las puzolanas naturales, ya

^{1 2 3} Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller” (FIANS), Universidad Autónoma de Tamaulipas, México rtobias@docentes.uat.edu.mx

que, como materiales activos, conceden a los cementos resultantes características y comportamientos determinados distintos y mejores en muchos aspectos en comparación con los cementos Portland comunes que no contienen adiciones activas o componentes secundarios (p. 4)

En relación con lo anterior, investigaciones en todo el mundo tienen como objetivo el analizar y comparar el comportamiento del concreto tanto en sus propiedades físicas y mecánicas, adicionando o incluso sustituyendo el material cementante del cemento Portland, por otros materiales que otorguen propiedades similares, tales como; las puzolanas de origen natural y artificial.

En la actualidad, el concreto ha sido estudiado con la incorporación de nuevas cenizas de origen natural y artificial, con el fin de conocer detalladamente el comportamiento que otorgan a sus propiedades tanto físicas como mecánicas.

Definición del problema

Las construcciones en la actualidad emplean concretos con adiciones modernas certificadas, con buen funcionamiento y eficiencia en su implementación. Las mezclas de concretos modernos siguen teniendo buenos resultados en sus propiedades físicas y mecánicas, pero el problema de estos concretos modernos es que presentan un alto costo en su aplicación dentro de las construcciones al manejarse en grandes volúmenes por la extensa porción de material cementante y los agregados que se emplean para su producción. Por tal motivo, se busca adicionar la ceniza del hueso seco bovino a la mezcla del concreto, con el fin de analizar el comportamiento que produce la adición de ceniza, en las propiedades físicas y mecánicas del concreto.

El concreto con adición de ceniza del hueso seco bovino, se enfoca en crear una mezcla de concreto que tenga la posibilidad de ser empleado en la construcción, compitiendo en el mercado con los cementos actuales y sus agregados mejorados, siempre y cuando se compruebe que este presenta un diseño que cumple con las especificaciones de las normas de construcción NMX mexicanas y las normas internacionales ASTM.

Por tal motivo, el presente estudio analiza un concreto con adición de cenizas del hueso seco bovino, con el fin de afrontar las problemáticas actuales en el proceso de fabricación del cemento como tanto en su empleo. El diseño del concreto con adición de ceniza del hueso seco bovino también busca colaborar con el medio ambiente reduciendo la contaminación de las mezclas de concreto actuales, incorporando nuevos materiales cementantes como el hueso seco bovino.

Objetivos

Objetivo general

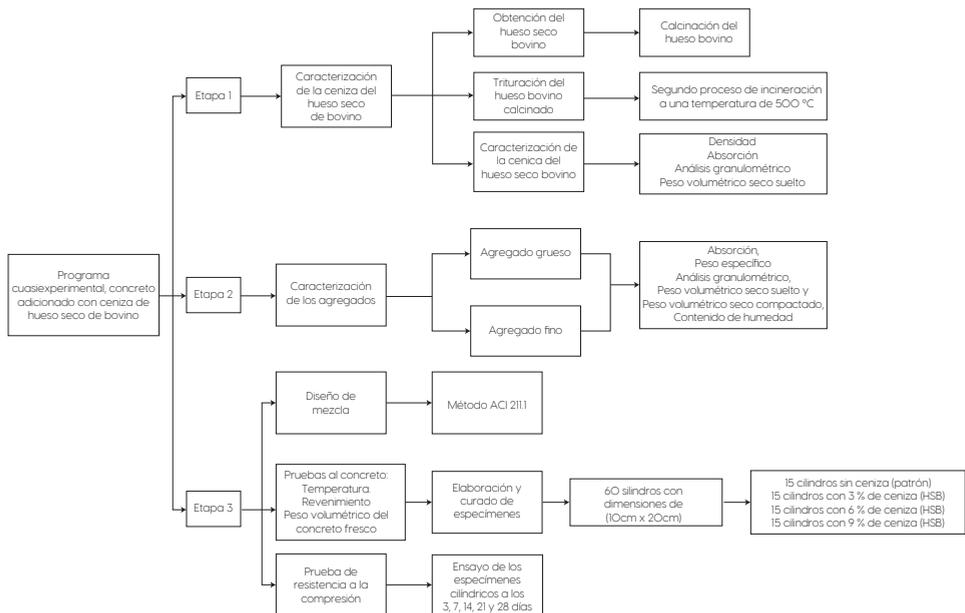
Analizar la resistencia a la compresión de un concreto adicionado con la ceniza obtenida de la calcinación del hueso seco bovino en diferentes proporciones con respecto a un concreto patrón de calidad $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$.

Objetivos específicos

- Determinar la resistencia a la compresión de un concreto adicionado con el 3.6 y 9% de ceniza de hueso seco bovino, respecto al de un concreto $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ a los 3, 7, 14, 21 y 28 días.
- Determinar cómo influye la adición de ceniza de hueso seco bovino con adición del 3.6 y 9%, en el revenimiento de un concreto, respecto a un concreto patrón $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$.
- Determinar el porcentaje óptimo de ceniza de hueso seco bovino, para obtener mejor resistencia a la compresión de un concreto.

Figura 1

Esquema experimental



Fuente: elaboración propia.

Método de la investigación

La presente investigación es cuasi experimental, debido a que la selección de los sujetos no fue aleatoria, sino que fueron seleccionados en tres grupos intactos de especímenes cilíndricos de concreto con adición de ceniza de hueso seco bovino. Segura (2003), describe que: “El cuasi experimento se utiliza cuando no es posible realizar la selección aleatoria de los sujetos participantes en dichos estudios. Por ello, una característica de los cuasi experimentos es el incluir "grupos intactos", es decir, grupos ya constituidos (p. 1). El método cuasi experimental empleado se muestra en la Figura 1.

Categorías, variables e indicadores

Las categorías variables e indicadores utilizados en la elaboración de un concreto con adición de ceniza de hueso seco bovino son (ver Tabla 1):

Tabla 1

Categorías, variables e indicadores que intervienen en la presente investigación

| Categoría | Tipo de variable | Tipo de variable | Indicador | Norma |
|--|------------------|-----------------------------|---|-----------|
| Concreto con adición de ceniza de hueso seco bovino $f_c=200$ kg/cm ² | Dependiente | Revenimiento | Grado de plasticidad del concreto fresco | ASTM C143 |
| | Dependiente | Peso volumétrico | Relación entre el peso y el volumen del concreto | ASTM C138 |
| | Dependiente | Resistencia a la compresión | Resistencia ante acrgas que tiende a aplastar al concreto | ASTM C39 |
| | Independiente | Peso volumétrico | Residuo obtenido de la incineración del hueso seco bovino | ----- |

Fuente: elaboración propia.

Población

La población de la presente investigación comprende los cilindros de concreto patrón y los cilindros de concreto adicionados con ceniza de hueso bovino.

Tamaño de la muestra

Las normas ASTM C31 Y ASTM C39, establecen que se deben elaborar dos o más especímenes para cada edad. Por lo que se consideró para la presente investigación un tamaño de muestra de 3 especímenes para cada edad de curado a los 3, 7, 14,

21 y 28 días. A continuación, se muestra el número de especímenes del concreto patrón y el concreto con adición de ceniza de hueso seco bovino para cada edad.

Tabla 2

Distribución de la muestra

| Número de días en la cámara de curado | Concreto patrón | Concreto con adición del 3% (CHSB) | Concreto con adición del 6% (CHSB) | Concreto con adición del 9% (CHSB) |
|---------------------------------------|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 7 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 14 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 21 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 28 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Total de especímenes cilíndricos | 15 | 15 | 15 | 15 |

Total de muestra = 60 especímenes cilíndricos.

Fuente: elaboración propia.

Obtención del hueso seco bovino

Para la presente investigación, se realizó la recolección de los huesos secos bovinos alrededor de los predios de la colonia Nuevo Michoacán, en el municipio de Pánuco, Veracruz (zona rural).

Figura 2

Ubicación geográfica de la colonia Nuevo Michoacán



Fuente: elaboración propia.

Durante el proceso de recolección, se logró obtener alrededor de 20 kilogramos de huesos secos bovinos, en los terrenos parcelarios que se encuentran alrededor de la colonia Nuevo Michoacán (ver Figura 3).

Figura 3

Recolección de los huesos secos de origen bovino



Fuente: elaboración propia.

Calcinación del hueso seco bovino

El proceso de la primera etapa de calcinación del hueso seco bovino disminuye la dureza de este. El tiempo de calcinación fue de máximo 3 horas empleando un soplete maneral marca Linmex con boquilla de 2 cm de diámetro; el tipo de combustible que se empleó fue el gas doméstico (GLP); no se consideró un control de temperatura. Este proceso se efectuó con el fin de ejecutar la etapa de trituración del hueso bovino, para obtener un material más fino utilizado para la segunda etapa de incineración a una temperatura de 500 °C.

Figura 4

Hueso seco bovino antes y después de la calcinación



Fuente: elaboración propia.

Trituración del hueso seco bovino calcinado

El proceso de trituración del hueso seco bovino calcinado, fue para reducir el tamaño de los huesos a un polvo fino, para su inmediata incineración en el horno artesanal. El método consistió en la trituración de 12 kilogramos de hueso seco bovino en la máquina de los Ángeles, localizada en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller” (ver Figura 5).

Figura 5

Trituración del hueso bovino calcinado con un número de 1450 revoluciones en la máquina de los Ángeles



Fuente: elaboración propia.

Proceso de trituración

A. Se pesaron 6 kilogramos de hueso bovino calcinado para cada etapa de trituración.

B. Se pesaron 5 kilos de bolas de acero, y se colocaron en la máquina de los ángeles junto con los huesos calcinados. El número de bolas de acero fue 7 con un diámetro de 5.75 cm cada una.

C. El siguiente paso fue programar el contador de la máquina de los Ángeles, para que se ejecutaran 1450 revoluciones para obtener la finura que permitiera una incineración más rápida del material.

Incineración del hueso seco bovino triturado

La incineración del hueso bovino se realizó con la ceniza producto de la trituración en la máquina de los Ángeles. A continuación, se muestra una comparación de la ceniza obtenida de la trituración y de la ceniza obtenida de la calcinación (ver Figura 6).

Figura 6

Comparación de la ceniza de hueso seco bovino antes y después de la calcinación



Fuente: Elaboración propia.

Para este proceso, se tomó una muestra de 500 gramos de ceniza de hueso seco bovino para la incineración en un lapso de 3 horas y 30 minutos en un horno artesanal. El horno artesanal fue realizado con los siguientes materiales:

A. Un tubo con un espesor de 0.5, diámetro de 16 y una longitud de 57 cm.

B. El tubo de acero fue cubierto con bloques de arcilla (ladrillos), para no dejar escapar la temperatura que se generaba dentro del mismo.

La incineración se realizó a una temperatura de 500 °C, empleando un soplete maneral marca Linmex con boquilla de 2 cm de diámetro, y gas doméstico (GLP) como combustible (ver Figura 7).

Figura 7

Vista frontal de la incineración en el horno artesanal



Fuente: elaboración propia.

El control de temperatura se realizó con un termómetro infrarrojo marca (CRAFTSMAN), que mediante un rayo láser, mide temperaturas desde los -28 °C hasta 76 °C (ver Figura 8).

Figura 8

Medición de la temperatura en el proceso de incineración



Fuente: elaboración propia.

El termómetro infrarrojo sólo registraba la medida en grados Fahrenheit, por lo que se realizó la conversión a grados Celsius.

Análisis de los datos

Para el análisis de datos, se tomaron 15 cilindros de concreto patrón, con cada una de las siguientes proporciones del 3, 6 y 9% de adición de ceniza de hueso seco bovino. Todas las muestras fueron elaboradas con el mismo diseño de mezcla, con la misma marca y cantidad de cemento portland ordinario (CPO 40).

Todos los especímenes cilíndricos fueron sometidos a pruebas de compresión en periodos de tiempo de 3, 7, 14, 21 y 28 días de curado. Estas pruebas se efectuaron en la máquina de ensayo universal marca Forney Modelo LT-1150 que cuenta con una capacidad de 150 toneladas.

Los datos se analizaron en Microsoft Office Excel 2016, una herramienta informática de apoyo en el cálculo de promedios y cálculos de los datos de las pruebas de compresión. Asimismo, el programa permite agrupar la información en tablas.

Resultados

Presentamos los resultados de las 3 etapas que se indicaron en el programa cuasi experimental. La primera y segunda etapa consistieron en la caracterización de la ceniza del hueso seco bovino, agregado grueso (grava) y agregado fino (arena). Asimismo, la tercera etapa consistió en realizar pruebas al concreto en estado fresco y endurecido, con el objetivo de analizar el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas del concreto patrón y el concreto adicionado con el 3, 6 y 9% de ceniza del hueso seco bovino.

De esta manera, los datos se analizaron e interpretaron mediante el uso de tablas con el fin de obtener un control y organización, y para permitir una presentación formal de los resultados.

La alta generación de la AF, sus propiedades fisicoquímicas y la mayor concientización por los problemas ambientales que este subproducto podría producir ha llevado a los investigadores a estudiar la viabilidad de la utilización de este subproducto en hormigón con reemplazo parcial o total de arena natural (AN). Este capítulo describe el comportamiento del hormigón con reemplazos parciales o totales de AN en estado fresco, el comportamiento mecánico y finalmente, se abordará la durabilidad.

Densidad de la ceniza del hueso seco bovino

En la Tabla 3 se presenta el resultado obtenido de la densidad de la ceniza del hueso seco bovino.

Tabla 3

Densidad de la ceniza del hueso seco bovino

| Propiedad | Valor | Unidad |
|---|-------|-------------------|
| Densidad de la ceniza del hueso seco bovino | 2.81 | g/cm ³ |

Fuente: elaboración propia.

Se deduce que la densidad de la ceniza del hueso seco bovino con un valor de 2.81 g/cm³ es cercano a la densidad del cemento que ronda entre los 2.9 y 3.1 g/cm³.

Porcentaje de absorción de la ceniza del hueso seco bovino

Tras la realización de la prueba, en la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos del porcentaje de absorción de la ceniza del hueso seco bovino.

Tabla 4*Resultados obtenidos del porcentaje de absorción de la ceniza del hueso seco bovino*

| Absorción | Valor | Unidad |
|-----------------------------|-------|--------|
| Muestra 1 | 28.52 | % |
| Muestra 2 | 28.88 | % |
| Absorción promedio = 28.70% | | |

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la absorción, se caracterizó a la ceniza del hueso seco bovino como un material demasiado poroso y absorbente, debido a que contiene un alto porcentaje de absorción de agua. Estos resultados corresponden a la ceniza calcinada a una temperatura de 500 °C del presente estudio.

Análisis granulométrico de la ceniza del hueso seco bovino

Los resultados obtenidos del análisis granulométrico de la ceniza del hueso seco bovino se observan en la Tabla 5.

Tabla 5*Resultados obtenidos del análisis granulométrico de la ceniza del hueso seco bovino*

| Peso lavado inicial | | 74.01 | G | Peso lavado final | | 53.2 | G |
|---------------------|---------------|------------------|--------------|-----------------------------|--------|-------------------------|-----------------|
| No. Tamiz | Diámetro (mm) | Retenido Parcial | | Peso Retenido Acumulado (G) | % Pasa | Especificaciones % Pasa | |
| | | Peso Retenido(G) | % Pasa | | | Límite inferior | Límite superior |
| 3/8" | 9.52 | ..... | ..... | ..... | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| Nº4 | 4.75 | ..... | ..... | ..... | 100.00 | 95.00 | 100.00 |
| Nº8 | 2.36 | ..... | ..... | ..... | 100.00 | 80.00 | 100.00 |
| Nº16 | 1.18 | 3.68 | 4.97 | 4.97 | 95.03 | 30.00 | 85.00 |
| Nº30 | 0.60 | 12.00 | 16.21 | 21.18 | 78.81 | 25.00 | 60.00 |
| Nº50 | 0.30 | 13.40 | 18.11 | 39.29 | 60.71 | 10.00 | 30.00 |
| Nº100 | 0.15 | 24.12 | 32.59 | 71.88 | 28.12 | 2.00 | 10.00 |
| P-Nº100 | ..... | 20.81 | 28.12 | 100.00 | .... | ..... | ..... |
| Suma | ..... | 74.01 | 100.00 | ..... | .... | ..... | ..... |
| <<< | | 1.37 | Adimensional | | | | |
| Pasa Tamiz # 200 | | 28.12 | % | | | | |

Fuente: elaboración propia.

La ceniza del hueso seco bovino calcinada a una temperatura de 500 °C es un material demasiado fino. La curva granulométrica de la ceniza del hueso seco bovino queda fuera de los límites permisibles de una arena de acuerdo con la Norma ASMTTC33. Asimismo, la ceniza es un material demasiado fino con respecto a la granulometría de una arena.

Peso volumétrico seco suelto de la ceniza del hueso seco bovino

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del peso volumétrico seco suelto de la ceniza del hueso seco bovino en la Tabla 6.

Tabla 6

Resultados obtenidos del peso volumétrico seco suelto de la ceniza del hueso seco bovino

| Peso volumétrico seco suelto | Valor promedio | Unidad |
|---|----------------|-------------------|
| Muestra 1 | 0.8399 | kg/m ³ |
| Muestra 2 | 0.8401 | Kg/m ³ |
| Peso volumétrico seco suelto promedio = 840 Kg/m ³ | | |

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el peso volumétrico que se obtuvo para la ceniza del hueso seco bovino fue de 0.840 g/cm³ o 840 kg/m³. De acuerdo con el *Manual del constructor de Cemex* se puede mencionar que el peso volumétrico del cemento ronda alrededor de los 1440 kg/m³.

Diseño de mezcla por el método de peso estimado

El diseño de mezcla que se obtuvo para un metro cúbico de concreto con base en el diseño de mezcla del ACI 211.1-91 por el método del peso estimado. Es necesario mencionar que, con base en esta dosificación, se obtuvo la proporción para la elaboración del diseño de mezcla del concreto patrón.

Diseño de mezcla del concreto patrón

El diseño de mezcla para la elaboración del concreto patrón se determinó con base en el proporcionamiento obtenido de la dosificación para un metro cúbico de concreto por el método del peso estimado.

Tabla 7*Dosificación para un (m³) de concreto patrón*

| Proporcionamiento concreto patrón | | |
|-----------------------------------|----------|--------|
| Material | Cantidad | Unidad |
| Cemento | 8.48 | kg |
| Grava | 26.46 | kg |
| Arena | 19.28 | kg |
| Agua | 6.58 | L |

Fuente: elaboración propia.

El proporcionamiento que se muestra es el que se considera para la elaboración de 15 especímenes cilíndricos de concreto patrón.

Diseño de mezcla del concreto con adición del 3, 6 y 9% de ceniza del hueso seco bovino

Se muestra el proporcionamiento de ceniza del hueso seco bovino para la elaboración de cada diseño de mezcla. La proporción del concreto con adición de ceniza del hueso seco bovino es el mismo proporcionamiento que se utiliza en el diseño del concreto patrón, con la diferencia que a cada dosificación se le adiciona el 3, 6 y 9% de (CHSB) en kilogramos por volumen total de los materiales de 0.025 m³ para la elaboración de los especímenes cilíndricos de concreto patrón.

Temperaturas de las mezclas de concreto

En este apartado se exponen las temperaturas de las mezclas de concreto patrón y el concreto adicionado con ceniza de hueso seco bovino.

Tabla 8*Temperaturas obtenidas de las mezclas de concreto*

| Mezcla | Tipo de concreto | Temperatura (°C) |
|--------|-------------------------------------|------------------|
| 1 | Concreto patrón | 29 |
| 2 | Concreto con adición del 3 % (CHSB) | 30 |
| 3 | Concreto con adición del 6 % (CHSB) | 30 |
| 4 | Concreto con adición del 9 % (CHSB) | 31 |

Fuente: elaboración propia.

La mezcla de concreto patrón presenta menor temperatura respecto a las mezclas de concreto con adición del 3, 6 y 9% de la (CHSB). Mientras que la norma ASTM C143, establece una temperatura de 24 °C para la mezcla obtenida del concreto fresco.

Revenimientos de las mezclas de concreto

Los resultados que se obtuvieron de la prueba de revenimiento del concreto patrón y el concreto adicionado con ceniza de hueso seco bovino, se muestran a continuación:

Tabla 9

Revenimientos obtenidos de las mezclas de concreto

| Mezcla | Tipo de concreto | Revenimiento (cm) |
|--------|-----------------------------------|-------------------|
| 1 | Concreto patrón | 19 |
| 2 | Concreto con adición del 3%(CHSB) | 17.1 |
| 3 | Concreto con adición del 6%(CHSB) | 16 |
| 4 | Concreto con adición del 9%(CHSB) | 12.5 |

Fuente: elaboración propia.

El revenimiento de la mezcla del concreto patrón y el concreto con adición del 3 y 6% de la ceniza del hueso seco bovino, se encuentran dentro del rango del revenimiento que se propuso de 15 a 17.5 cm con un error permitido de (± 2 cm), para el diseño de mezcla de un metro cúbico de concreto. Mientras que, en el concreto con adición del 9% la (CHSB), se obtuvo un revenimiento demasiado bajo; esto se puede deber que, a mayor porcentaje de ceniza, el revenimiento del concreto empieza a disminuir.

Pesos volumétricos del concreto fresco

Como puede observar en los resultados el peso volumétrico del concreto patrón es inferior al del concreto con adición del 3 y 6% de la ceniza del hueso seco bovino. Mientras que el concreto adicionado con el 9% de la (CHSB), se obtuvo un peso volumétrico menor al del concreto patrón.

Concreto patrón

Los resultados de la resistencia a la compresión obtenidos de los cilindros del concreto patrón a los 3, 7, 14 y 28 días, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 10

Resistencia a la compresión de los cilindros del concreto patrón

| Tipo de concreto | Resistencia a compresión en (kg/cm ²) | | | | | Unidades |
|----------------------|---|---------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|
| | Edad (3 días) | Edad (7 días) | Edad (14 días) | Edad (21 días) | Edad (28 días) | |
| Concreto patrón | 147.21 | 162.5 | 211.36 | 220.27 | 230.46 | kg/cm ² |
| | 146.57 | 161.23 | 211.15 | 219 | 229.18 | kg/cm ² |
| | 144.34 | 162.03 | 213.27 | 220.91 | 229.82 | kg/cm ² |
| Resistencia promedio | 146.04 | 161.92 | 211.93 | 220.06 | 229.82 | kg/cm ² |

Fuente: elaboración propia.

En los resultados se puede observar que el comportamiento de la resistencia a la compresión de los cilindros del concreto patrón, fue evolucionando hasta alcanzar su resistencia máxima a los 28 días. Asimismo, es necesario mencionar que el diseño de mezcla fue elaborado para alcanzar una resistencia de diseño $f'_c = 200 \text{ kg/cm}^2$, considerando un factor de seguridad del 10 %; obteniéndose una nueva resistencia de diseño $f'_c = 220 \text{ kg/cm}^2$.

Concreto con adición del 3% de la ceniza del hueso seco bovino (CHSB)

En la Tabla 11, se muestran los resultados obtenidos de la prueba de resistencia a la compresión del concreto adicionado con el 3% de ceniza del hueso seco bovino (CHSB).

Tabla 11

Resistencia a la compresión de los cilindros del concreto con adición del 3% de la ceniza del hueso seco bovino (CHSB)

| Tipo de concreto | Resistencia a compresión en (kg/cm ²) | | | | | Unidades |
|---------------------------------------|---|---------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|
| | Edad (3 días) | Edad (7 días) | Edad (14 días) | Edad (21 días) | Edad (28 días) | |
| Concreto con adición del 3% de (CHSB) | 155.49 | 175.25 | 215.31 | 231.73 | 233.47 | kg/cm ² |
| | 154.06 | 174.43 | 218.58 | 232.83 | 232.83 | kg/cm ² |
| | 154.7 | 173.97 | 219 | 233.24 | 232.6 | kg/cm ² |
| Resistencia promedio | 154.75 | 174.55 | 217.63 | 232.6 | 232.97 | kg/cm ² |

Fuente: elaboración propia.

Con base en los resultados obtenidos de la tabla anterior, se puede definir que, a mayor porcentaje de adición de ceniza del hueso seco bovino al concreto, esta mejora la resistencia a la compresión de este.

Concreto con adición del 6% de la ceniza del hueso seco bovino (CHSB)

En la Tabla 12, se presentan los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión del concreto con adición del 6% de ceniza del hueso seco bovino (CHSB) a los 3, 7, 14, 21 y 28 días de edad.

Tabla 12

Resistencia a la compresión de los cilindros del concreto con adición del 6% de la ceniza del hueso seco bovino (CHSB)

| Tipo de concreto | Resistencia a compresión en (kg/cm ²) | | | | | Unidades |
|---------------------------------------|---|---------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|
| | Edad (3 días) | Edad (7 días) | Edad (14 días) | Edad (21 días) | Edad (28 días) | |
| Concreto con adición del 6% de (CHSB) | 161.06 | 179.25 | 224.31 | 237.7 | 240.64 | kg/cm ² |
| | 158.84 | 179.71 | 223.68 | 237.06 | 241.28 | kg/cm ² |
| | 159.79 | 179.53 | 224.09 | 236.19 | 240.01 | kg/cm ² |
| Resistencia promedio | 159.9 | 179.5 | 224.03 | 236.98 | 240.64 | kg/cm ² |

Fuente: elaboración propia.

Con base en los resultados obtenidos de la tabla anterior, se puede definir que, a mayor porcentaje de adición de ceniza del hueso seco bovino al concreto, esta mejora la resistencia a la compresión de este.

Concreto con adición del 9% de la ceniza del hueso seco bovino (CHSB)

Se puede observar que la resistencia a compresión del concreto adicionado con el 9% de ceniza del hueso seco bovino fue menor respecto a la resistencia a la compresión del concreto patrón y los concretos adicionados con el 3% y 6% de (CHSB).

Tabla 13

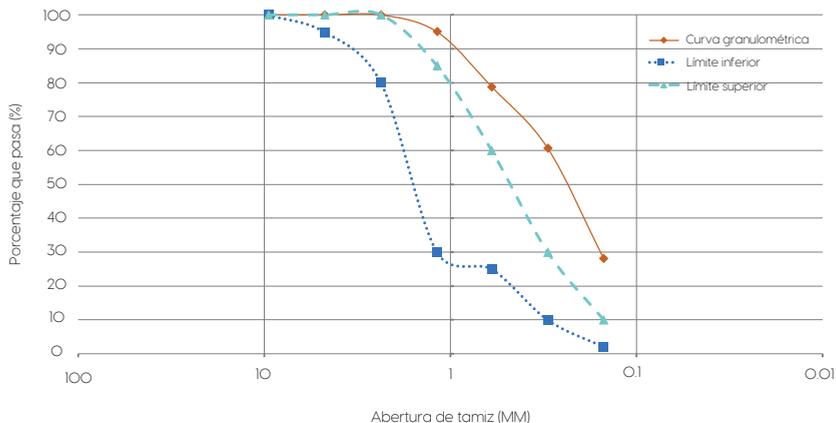
Resistencia a la compresión de los cilindros del concreto con adición del 9 % de la ceniza del hueso seco bovino (CHSB)

| Tipo de concreto | Resistencia a la compresión promedio | | | | | Unidades |
|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|
| | Edad (3 días) | Edad (7 días) | Edad (14 días) | Edad (21 días) | Edad (28 días) | |
| Concreto patrón | 146.04 | 161.92 | 211.93 | 220.06 | 229.82 | kg/cm ² |
| Concreto con adición del 3% de (CHSB) | 154.75 | 174.55 | 217.63 | 232.6 | 232.97 | kg/cm ² |
| Concreto con adición del 6% de (CHSB) | 159.9 | 179.5 | 224.03 | 236.98 | 240.64 | kg/cm ² |
| Concreto con adición del 9% de (CHSB) | 137.72 | 157.46 | 201.39 | 216.17 | 225.51 | kg/cm ² |

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 1

Curva granulométrica de la ceniza del hueso seco bovino



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Se determinó que la ceniza calcinada a una temperatura de 500 °C del hueso seco bovino, puede mejorar la propiedades físicas y mecánicas del concreto, si esta se adiciona en cantidades del 3 y 6% por el volumen total de materiales para la dosificación de una mezcla concreto $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$. Mientras que, con un porcentaje de adición del 9% de la ceniza del hueso seco bovino, el concreto alcanza la resistencia de diseño propuesta en la dosificación de la mezcla del

concreto, quedando está por debajo de los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión a los 28 días del concreto patrón y el concreto adicionado con el 3 y 6% de (CHSB).

De acuerdo con los objetivos planteados en el presente estudio, se cumplieron cada uno de ellos, los cuales se señalan a continuación:

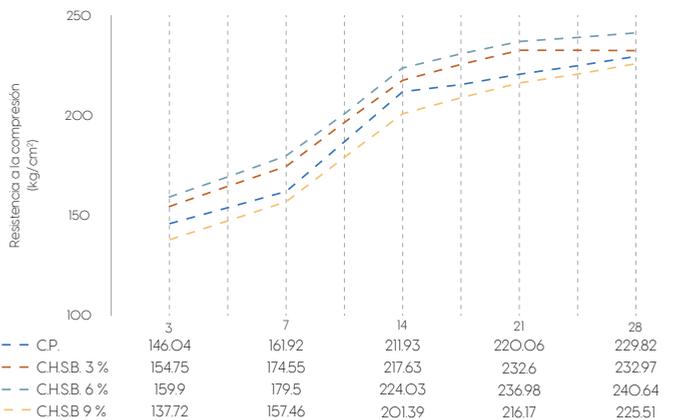
Se elaboraron 15 especímenes cilíndricos de concreto para realización de concreto patrón. Asimismo, se elaboraron 15 cilindros de concreto, para cada concreto con adición del 3, 6 y 9% de ceniza del hueso seco bovino. Los cilindros de concreto por cada dosificación de mezcla se elaboraron con el fin de poder determinar su resistencia a la compresión a los 3, 7, 14, 21 y 28 días de curado.

Para el cumplimiento del presente objetivo, se propuso un revenimiento de 15 a 17.5 cm, tanto para el concreto patrón y los concretos adicionados con ceniza de hueso seco bovino. Esto con el fin de analizar cómo afecta la adición del 3, 6 y 9% de (CHSB) al concreto respecto a un concreto patrón.

El presente objetivo, se logró a través del análisis de los resultados promedios obtenidos de la resistencia a la compresión a los 3, 7, 14, 21 y 28 días del concreto patrón y los concretos elaborados con adición del 3, 6 y 9% de ceniza del hueso seco bovino (CHSB). Esto se realizó, con el fin de determinar el porcentaje óptimo de adición de (CHSB), que brinda mejores propiedades mecánicas del concreto.

Gráfica 2

Resistencia a la compresión de los cilindros del concreto patrón y los concretos adicionados con ceniza del hueso seco bovino (CHSB)



Fuente: elaboración propia.

Referencias

- Abanto, F. (2009). Tecnología del concreto (2da ed., Vol. 2). Lima, Perú: San Marcos E.I.R.L.
- Akinyele, J., Adekunle, A., y Ogundaini, O. (2016). The effect of partial replacement of cement with bone ash and wood ash in concrete. *Annals of the Faculty of Engineering Huedoara*, 14(4), 199-204.
- Alvarado, J., Andrade, J., y Hernández, H. (2016). Estudio del empleo de cenizas producidas en ingenios azucareros como sustituto parcial del cemento Portland en el diseño de mezclas de concreto (Tesis de grado). Universidad Del Salvador, San Miguel, El Salvador.
- American Society of the International Association for Testing and Materials. (2003). (ASTM C595) *Standard Specification for Blended Hydraulic Cement*.
- _____. (2011). (ASTM C702) *Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*.
- _____. (2012). (ASTM C150) *Standard Specification for Portland Cement*.
- _____. (2015). (ASTM C127) *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*.
- _____. (2015). (ASTM C128) *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*.
- _____. (2015). (ASTM C143) *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*.
- _____. (2017). (ASTM C1064) *Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete*.
- _____. (2017). (ASTM C138) *Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*.
- _____. (2017). (ASTM C188) *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*.
- _____. (2017). (ASTM C29) *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*.
- _____. (2018). (ASTM C33) *Standard Specification for Concrete Aggregates*.
- _____. (2018). (ASTM C39) *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- _____. (2019). (ASTM C31) *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*.
- _____. (2019). (ASTM C566) *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*.
- Arguedas, O. (2009). La pregunta de investigación. *Acta Médica Costarricense*, 51(2), 89-90. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43411939006>
- Cabrera, J., Escalante, J., y Castro, P. (2016). Resistencia a la compresión de concretos con escoria de alto horno. Estado del arte re-visitado. *ALCONPAT*, 6(1), 64-83. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352016000100064&lng=es&tlng=es.

Calleja, J. (septiembre de 1982). *Cenizas, cementos y hormigones con cenizas*. *Materiales de construcción*, 32(187), 3-38. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/mc.1982.v32.i187.1006>

Sección III

Gestión ambiental y
cambio climático

El estado de la vivienda en Tamaulipas (2000-2020)

Elda Margarita Hernández Rejón¹

Raúl Treviño Hernández²

Aurora Martínez Loaiza³

Resumen

El objetivo de este capítulo fue analizar la forma en que han evolucionado los principales indicadores de vivienda en Tamaulipas. Primero se observó la evolución de la tenencia de la propiedad y el tamaño de las viviendas de acuerdo con el número de cuartos con los que dispone. Después se vio cómo ha evolucionado la prestación de servicios básicos como la energía eléctrica, agua y drenaje. Finalmente se describen los tipos de materiales utilizados para la construcción de los pisos, techos y paredes de las viviendas, en el periodo 2000-2020.

Se utilizó la estadística descriptiva que comparó la evolución de los indicadores de tenencia, tamaño, servicios, tipo de materiales, y se realizó el análisis de la evolución de los mismos en las viviendas de Tamaulipas a lo largo del periodo de estudio, tratando de responder la pregunta, ¿cuáles son las áreas de oportunidad en materia de vivienda en el estado de Tamaulipas?, para estar en condiciones de presentar o sugerir en donde se necesita mayor atención y por este motivo dónde es necesario elaborar políticas públicas adecuadas y pertinentes.

Palabras clave: vivienda, habitabilidad, políticas públicas.

Introducción

La importancia de la vivienda ha sido estudiada desde diferentes ángulos, y es que, como puntualiza Rosahn (1957, p. 9): “[...] contribuye al desarrollo social de una comunidad por medio de su influencia en la vida familiar”.

Esta perspectiva es acuñada también por Karl Jung (1964) al considerar a la vivienda como “símbolo de la familia [que entre otras cosas] representa la asociación entre los más profundos niveles de necesidades fisiológicas y psicológicas con el entorno construido” (citado por Medrano, 2005, p. 12).

¹²³ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Tamaulipas, México. mrejon@docentes.uat.edu.mx

Desde la visión económica se tiene que:

[...] el simple hecho de vivir en casas más confortables tiende a elevar la productividad de los trabajadores, dándoles más incentivos para trabajar a fin de mantener un determinado nivel de bienestar, posibilitándoles el pago de rentas más elevadas por mejores viviendas [...] (UANL, 1976, p. 5).

El contar con una vivienda adecuada es un derecho humano internacional, como componente fundamental para que las personas tengan un nivel de vida adecuado. Este derecho es reconocido en México en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en su artículo cuarto. En este sentido, más allá de saber el número de viviendas que se han construido en determinado tiempo, es esencial conocer el estado de la vivienda a escala estatal y local, para establecer áreas de oportunidad y retos, así como planes y programas que incidan en las condiciones de habitabilidad y calidad de vida de las personas.

ONU-Hábitat ha establecido siete elementos a considerar para una vivienda adecuada, los cuales son: seguridad de la tenencia, disponibilidad de servicios, materiales, instalaciones e infraestructura, asequibilidad, habitabilidad, accesibilidad, ubicación y adecuación cultural (ONU-Hábitat, 2018). Dichos criterios son atendidos de manera específica por la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano y la Comisión Nacional de Vivienda, en el documento “Criterios técnicos para una vivienda adecuada” (Sedatu, 2019).

Hay diferentes factores que ejemplifican de manera fehaciente la necesidad de los individuos de poseer una vivienda digna, decorosa y adecuada, que entre otras cosas tenga las facilidades de acceso a la misma y que además aporte estabilidad económica y que mejore la salud de las familias que la habitan (ECOSOC, 2005).

En México, de acuerdo con datos de la OCDE (2020), la situación de la vivienda es negativa y con poca proyección de mejora, el país se encuentra en el lugar 39 de 41 países que integran este organismo (ver Imagen 1), solo por encima de Sudáfrica y la República Eslovaca. Este organismo evalúa, entre otros indicadores, el rezago habitacional, que considera variables como: viviendas con hacinamiento, materiales de pisos, techos y paredes, entre otros.

De acuerdo con el CIDOC, en el 2010 en México, aproximadamente el 30 por ciento de las viviendas tenía algún tipo de rezago habitacional y más del 60 por ciento de estas se encuentran en el territorio urbano del país, y concluyó que las familias que no tienen acceso a una vivienda digna, decorosa y adecuada son el 33 por ciento; por esta situación se vuelve necesario constatar con la situación actual de la vivienda, para comparar los resultados de la evolución de la última década con los de este estudio.

Imagen 1

Lugar de México en la OCDE



Fuente: OCDE 2020.

El objetivo de este capítulo es analizar la forma en que han evolucionado los principales indicadores de vivienda en Tamaulipas, en el periodo del 2000 al 2020. Se describe la evolución de los indicadores: tenencia de la propiedad, número de cuartos con los que dispone la vivienda, prestación de servicios básicos energía, agua y drenaje; así como tipo de materiales de los pisos, techos y paredes.

Se toman en cuenta estos indicadores ya que son los que organismos internacionales como la OCDE utilizan para evaluar y diagnosticar la situación de la vivienda y porque presentan las condiciones óptimas para tener una vivienda digna y adecuada.

Descripción de la zona de estudio

El Estado de Tamaulipas se ubica al Noreste de la República (ver Imagen 2), tiene una población de 3 527 735 habitantes, de los cuales más del 50 por ciento es decir 1 791 595 son mujeres y aproximadamente el 49 por ciento es decir 1 736 140 son hombres y representa el 3 por ciento del total de la población del país.

Aproximadamente más del 90 por ciento de la población es urbana 3 183 836 habitantes, de los cuales más del 50 por ciento son mujeres (1 625 221 habitantes) y cerca del 49 por ciento son hombres (1 558 615 habitantes) distribuidos en 46 localidades urbanas, y solo cuenta con un 10 por ciento de población rural 343 899 habitantes, de los cuales cerca del 49 por ciento son mujeres (168 230) y poco más del 50 por ciento son hombres (175 669), distribuidos en 6520 localidades rurales. Existen 1 009 451 viviendas en total, de las cuales poco más del 90 por ciento (909 747 unidades) son viviendas urbanas y poco menos del 10 por ciento (99 704 unidades) son viviendas rurales (INEGI, 2020).

Imagen 2

Ubicación de la zona de estudio



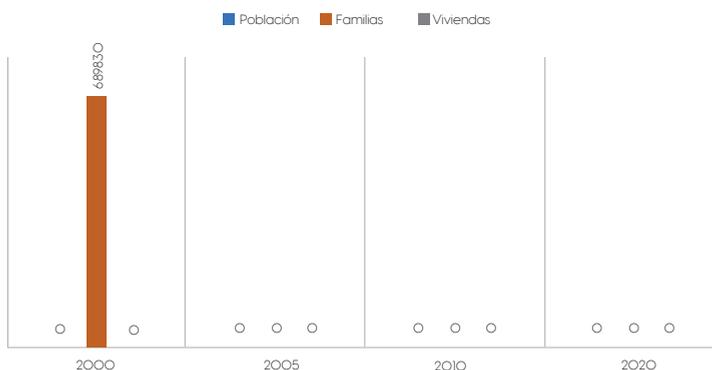
Fuente: elaboración propia con ayuda del Google Earth 2022.

Análisis de la tenencia de la vivienda

La estadística que resulta de este análisis puede ser un parámetro de la riqueza que tienen los ciudadanos radicados en Tamaulipas. En materia de tenencia se hace una clasificación de propias y no propias. En el 2000, existía una población de 2 753 222 habitantes, con un stock de viviendas de 677 489 viviendas para satisfacer una demanda de 689 830 familias (ver Gráfica 1).

Gráfica 1

Población, familias y viviendas en Tamaulipas (2000-2020)

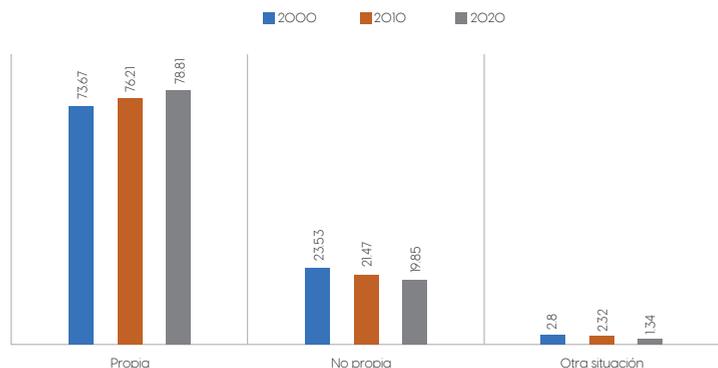


Fuente: elaboración propia con datos de INEGI 2000, 2005, 2010, 2020.

Así, en ese mismo año las viviendas que eran catalogadas como propias era el 73.67 por ciento con respecto al total de vivienda, y 23.53 por ciento no eran propias (ver Gráfica 2).

Gráfica 2

Tenencia de la propiedad en Tamaulipas (2000-2020)



Fuente: elaboración propia con datos de INEGI 2000, 2010, 2020.

Si tomamos la oferta como el total de viviendas y la demanda como el número de familias, resulta un déficit de vivienda; pues la *ratio* de viviendas por familia era de 98.21 por ciento, un déficit de viviendas de 1.79 por ciento. (ver Tabla 1).

Tabla 1

Viviendas particulares habitadas, sus ocupantes y su distribución porcentual según tenencia

| Tamaulipas | 2000 | 2005 | 2010 | 2020 |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Población | 2 753 222 | 3 024 238 | 3 268 554 | 3 527 735 |
| Familias | 68 830 | 779 846 | 868 244 | 1 069 121 |
| Viviendas | 677 489 | 767 349 | 867 935 | 1 067 197 |
| Propias | 73.67 | ----- | 76.21 | 78.81 |
| No propia | 23.53 | ----- | 21.47 | 19.85 |
| Otra situación | 2.8 | ----- | 2.32 | 1.34 |
| Índice de vivienda por familia | 98.21 | 98.39 | 99.96 | 99.82 |
| <i>Ratio</i> de propiedad | 73.67 | ----- | 76.21 | 78.81 |

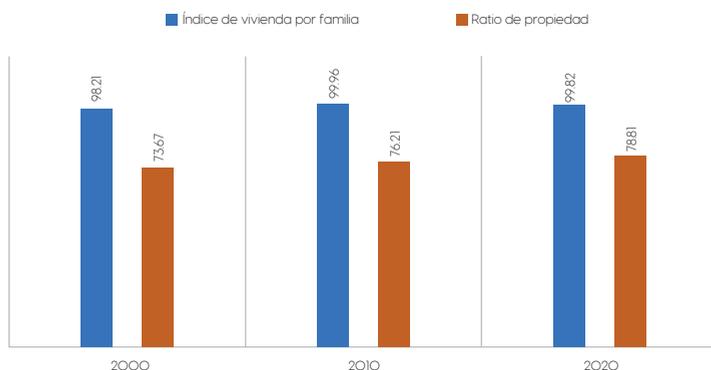
Fuente: elaboración propia con datos de INEGI 2000, 2005, 2010, 2020.

Para 2005 y 2010, el índice de vivienda por familia pasa de 98.39 a 99.96 lo cual da una idea de la reducción del déficit, además la *ratio* de propiedad pasa de 73.67 a 76.21 en ese mismo periodo. Para 2020 el déficit de vivienda tuvo un pequeño decremento al pasar a 99.82, lo cual no es significativo, pero la *ratio* de propiedad alcanzaría su mayor valor en ese año: 78.81 (ver Gráfica 3).

Otros indicadores importantes son los datos que muestran una tendencia creciente a la reducción del déficit en materia de vivienda y al incremento de la tenencia propia. Sin embargo, para 2020 se observan indicios de que el déficit empieza a crecer, aunque como ya se comentó ese crecimiento en el déficit no es significativo.

Gráfica 3

Índice y ratio de viviendas en Tamaulipas (2000-2020)



Fuente: elaboración propia con datos de INEGI 2000, 2010, 2020.

Análisis de la evolución del tamaño de la vivienda

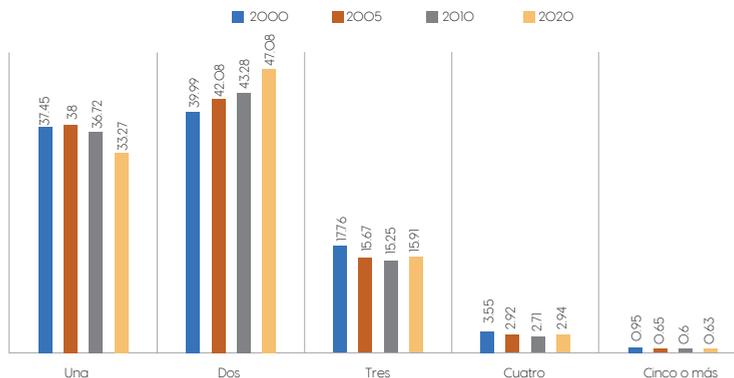
Este indicador permite observar la manera en que el tamaño de las viviendas ha evolucionado, según el número de cuartos con los que cuentan. Con esto se pueden apreciar dos indicadores importantes: el número de cuartos por vivienda y el número de personas por cuarto; estos indicadores permiten observar si hay hacinamiento o no en una vivienda promedio. En el estado de Tamaulipas el número de viviendas con un solo cuarto pasa de 37.45 por ciento en el 2000 a 33.27 por ciento en el 2020. Es en este año en donde se presenta el valor más bajo de viviendas con un cuarto con respecto al total (ver Tabla 2).

Tabla 2*Evolución del tamaño de las casas en Tamaulipas según el número de cuartos*

| Tamaulipas | 2000 | 2005 | 2010 | 2020 |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Vivienda | 677 489 | 767 349 | 867 935 | 1 067 197 |
| Población | 2 753 222 | 3 024 238 | 3 268 554 | 3 527 735 |
| Núm. de recámaras | | | | |
| Una | 37.45 | 38 | 36.72 | 33.27 |
| Dos | 39.99 | 42.08 | 43.28 | 47.08 |
| Tres | 17.76 | 15.67 | 15.25 | 15.91 |
| Cuatro | 3.55 | 2.92 | 2.71 | 2.94 |
| Cinco o más | 0.95 | 0.65 | 0.6 | 0.63 |
| No especificado | 0.31 | 0.67 | 1.43 | 0.17 |
| Total de cuartos | 2 365 848 | 2 702 364 | 3 094 267 | 3 847 578 |
| Cuartos por vivienda | 3.49 | 3.52 | 3.57 | 3.61 |
| Personas por cuarto | 1.16 | 1.12 | 1.06 | 0.92 |

Fuente: elaboración propia con datos de INEGI 2000, 2005, 2010, 2020.

Las viviendas con 3 cuartos pasan de 17.76 por ciento en el año 2000, a 15.91 por ciento en el 2020; observando un decremento en este sentido y alcanzando su valor mínimo en 2010 con un valor de 15.25 por ciento (ver Gráfica 4).

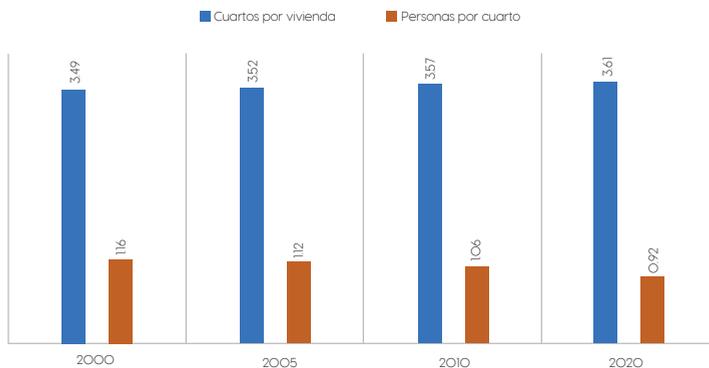
Gráfica 4*Porcentaje de dormitorios en viviendas de Tamaulipas (2000-2020)*

Fuente: elaboración propia con datos de INEGI 2000, 2005, 2010, 2020.

En el caso de las viviendas con cuatro recámaras sucede algo similar que con las de tres, ya que estas pasan de 3.55 por ciento en el año 2000 a 2.94 por ciento en el 2020, alcanzando su valor mínimo en 2010 con 2.71 por ciento. En general, se observa que la tendencia ha sido a disminuir el número de cuartos en sus viviendas. Sin embargo, lo que refleja el dato de número de cuartos, es diferente de lo que refleja el índice de cuartos por vivienda; este último es el resultado de dividir el total de cuartos entre el total de viviendas; lo que evidencia un aumento, aunque pequeño, sostenido, el cual nos dice que en el año 2000 había 3.49 cuartos por vivienda, siguiendo una tendencia ascendente hasta alcanzar un máximo en 2020 de 3.61 cuartos por vivienda, siendo superior a la de 2000 (ver Gráfica 5).

Gráfica 5

Cuartos por viviendas y personas por cuarto en Tamaulipas (2000-2020)



Fuente: elaboración propia con datos de INEGI 2000, 2005, 2010, 2020.

En lo referente al hacinamiento de personas por cuarto, en el año 2000 había 1.16 personas por cuarto en promedio, alcanzando su grado más bajo en el 2020 con 0.92 personas por cuarto; siendo éste el año con el indicador más bajo de hacinamiento. Las preferencias de la población Tamaulipeca tienden a generar viviendas más grandes en términos de cuartos. Sin embargo, esta percepción se corta en el 2020 haciendo que se construya de nueva cuenta una cantidad importante de viviendas de uno o dos cuartos, hecho que afecta claramente el índice de hacinamiento y de personas por cuarto en nuestro país.

Análisis de la evolución de los servicios de energía eléctrica, agua y drenaje de las viviendas

Además del tamaño de las viviendas y la tenencia de la propiedad, otros indicadores sustanciales son los servicios básicos con los que cuentan las viviendas, particularmente el drenaje, agua y energía eléctrica. En este apartado se describen de manera general estos indicadores y se analiza su comportamiento a escala estatal durante el periodo de estudio.

La característica principal de estos indicadores es que década tras década se ha visto un incremento en el número de viviendas que cuentan con servicios básicos, a diferencia de los otros indicadores (tenencia y dimensión), donde se observa que, aunque la tendencia era un aumento proporcional, muchos de ellos caían en el año 2020 (ver Tabla 3). En el caso de la dimensión de las viviendas, pudiera tener diversas explicaciones, una de ellas sería la tendencia en la última década a la urbanización vertical, al incremento en el costo de la vivienda en la región, y por ende el desarrollo de vivienda cada vez más pequeña.

Tabla 3

Servicios urbanos de energía eléctrica, agua y drenaje en Tamaulipas (2000-2020)

| Tamaulipas | 2000 | 2005 | 2010 | 2020 |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Viviendas | 677 489 | 767 349 | 867 935 | 1 067 197 |
| Población | 2 753 222 | 3 024 238 | 3 268 554 | 3 527 735 |
| Con drenaje | 503 611 | 634 980 | 753 760 | 1 011 145 |
| Con agua | 611 645 | 713 271 | 812 671 | 954 566 |
| Con electricidad | 640 917 | 734 495 | 841 641 | 1 058 620 |
| % con drenaje | 74.33 | 82.75 | 86.85 | 94.75 |
| % con agua | 90.28 | 92.95 | 93.63 | 89.45 |
| a | 94.6 | 95.72 | 96.97 | 99.2 |

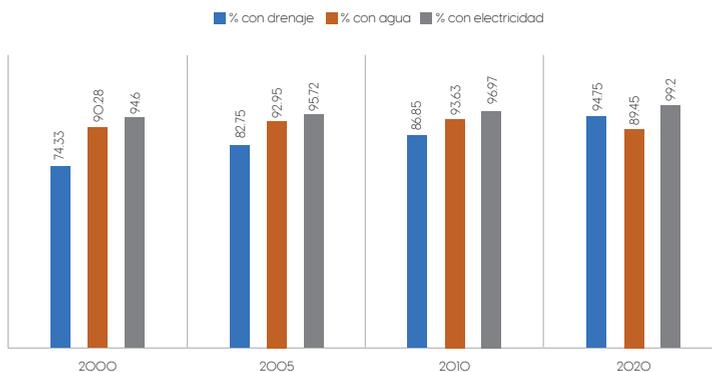
Fuente: elaboración propia con datos de INEGI 2000, 2005, 2010, 2020.

El indicador con mejor desempeño en Tamaulipas es el de la energía eléctrica, pues en el año 2000, 94.6 por ciento de las viviendas del estado contaban con este servicio y para el 2020 aumentó a 99.2 por ciento de viviendas. El indicador con el segundo mejor desempeño es el de drenaje, pues en el año 2000 sólo el 74.3 por ciento de las viviendas contaban con este servicio, aumentando para el año 2020 en 94.75 por ciento de las viviendas (ver Gráfica 6). De la misma forma, el tercer indicador ha sido el del agua, que en el año 2020 tuvo un retroceso ya que en el año

2000 el 90.28 por ciento de las viviendas del estado tenían este servicio, pero para el año 2020 solo aparecía en el 89.45 por ciento de las viviendas.

Gráfica 6

Porcentaje de viviendas con drenaje, agua y energía eléctrica en Tamaulipas (2000-2020)



Fuente: elaboración propia con datos de INEGI 2000, 2005, 2010, 2020.

Análisis de la evolución de los materiales de construcción utilizados para la edificación de las viviendas

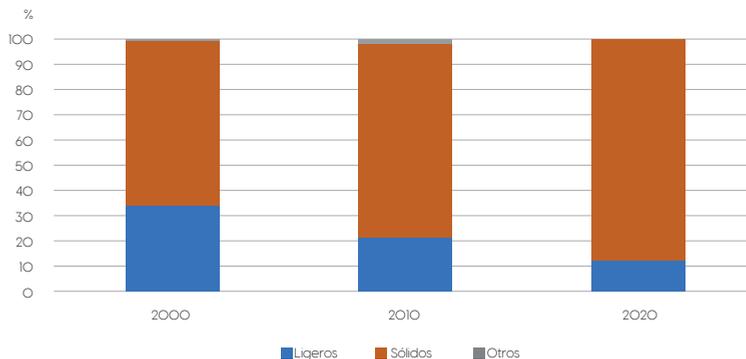
En este apartado se describen los materiales sólidos utilizados en la edificación de pisos, paredes y techos en las viviendas del estado de Tamaulipas. La tendencia general es que la calidad de las viviendas en Tamaulipas medida por la resistencia de los materiales que se emplean ha ido aumentando (Tabla 4).

En la construcción de pisos en viviendas de Tamaulipas, el uso de materiales sólidos, como el cemento para pisos, ha experimentado un pequeño decremento durante los últimos 20 años (ver Gráfica 7). Se observa que en el año 2000 había un 64.44 por ciento, disminuyendo en el 2010 a un 64.06 por ciento y finalmente en el año 2020 cayendo a un 61.42 por ciento; esto se puede explicar al observar los porcentajes de los pisos con material de mosaico o madera que tuvo un incremento significativo pasando de 26.51 por ciento en 2000 a 36.90 por ciento en 2020, asumiendo que para colocar el mosaico primero deben contar con el piso de cemento en las viviendas.

Tabla 4*Materiales de construcción para la vivienda*

| Tamaulipas | 2000 | 2010 | 2020 |
|---------------------------------|---------|---------|-----------|
| Viviendas | 677 489 | 867 935 | 1 067 197 |
| Material predominante en techos | | | |
| Ligeros | 34.3 | 21 | 12.07 |
| Sólidos | 65.11 | 77.19 | 87.91 |
| Otros | 0.59 | 1.89 | 0.02 |
| Material en pisos | | | |
| Cemento y firme | 64.44 | 64.06 | 61.42 |
| Madera, mosaico y otros | 26.51 | 31.03 | 36.9 |
| Tierra | 8.48 | 3.33 | 1.5 |
| No especificado | 0.57 | 1.58 | 0.18 |
| Material en paredes | | | |
| Sólidos | 75.86 | 88.9 | 94 |
| Ligeros | 23.64 | 13.3 | 5.9 |
| Otros | 0.5 | 1.79 | 0.1 |

Fuente: elaboración propia con datos de INEGI 2000, 2010, 2020.

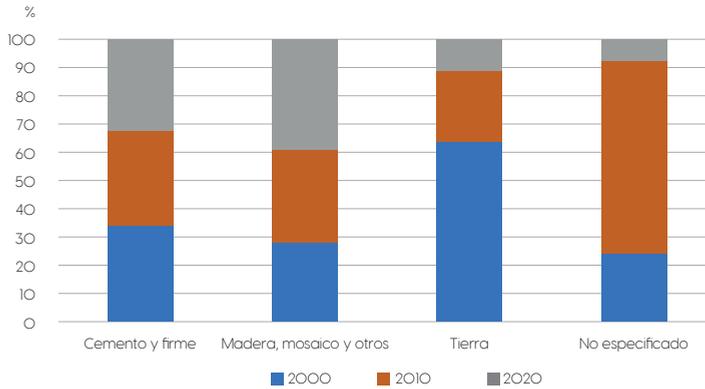
Gráfica 7*Porcentaje de tipo de material en piso en viviendas de Tamaulipas (2000-2020)*

Fuente: elaboración propia con datos de INEGI 2000, 2010, 2020.

En el uso de materiales sólidos en los techos en el año 2000, el 65.11 por ciento de las casas tenían materiales sólidos (ver Gráfica 8). En el resto de los años esta tendencia se mantuvo pues en el 2010 era el 77.19 por ciento de las viviendas y para el 2020 aumentó a 87.91 por ciento.

Gráfica 8

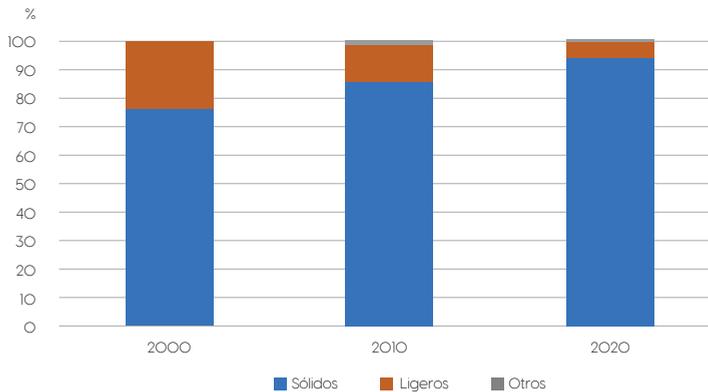
Porcentaje de tipo de material en techos en viviendas de Tamaulipas (2000-2020)



Fuente: elaboración propia con datos de INEGI 2000, 2010, 2020.

Gráfica 9

Porcentaje de tipo de material en paredes en viviendas de Tamaulipas (2000-2020)



Fuente: elaboración propia con datos de INEGI 2000, 2010, 2020.

En lo referente a los materiales sólidos utilizados en las paredes, se tiene que en el año 2000 el 75.86 por ciento de las viviendas en Tamaulipas tienen alguno de estos materiales (ver Gráfica 9); para 2010 aumenta a 88.90 por ciento, manteniéndose este incremento sostenido, ya que para el año 2020 se tienen 94 por ciento de viviendas con estos materiales en paredes.

Conclusiones

A la luz de los datos descritos en este capítulo de libro, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

El índice de vivienda por familia crece significativamente, lo cual da una idea de la reducción del déficit de vivienda, aunque este déficit de vivienda tuvo un decremento poco significativo. También la ratio de propiedad aumentó en ese mismo periodo, además que los datos muestran una tendencia a la reducción del déficit en materia de vivienda al mismo tiempo que un incremento en el índice de la tenencia de la propiedad, sin embargo, se observan indicios de que el déficit empieza a crecer, aunque ese crecimiento en el déficit no es significativo.

Con respecto al número de cuartos en las viviendas, en general se observa que la tendencia ha sido a disminuir. Sin embargo, el dato de número de cuartos refleja, lo contrario al índice de cuartos por vivienda; ya que éste último evidencia un aumento, aunque pequeño, sostenido.

El hacinamiento de personas por cuarto ha disminuido sostenidamente a lo largo del periodo estudiado según estos datos, se puede decir que las preferencias de la población tamaulipeca están enfocadas en generar viviendas más grandes en términos de cuartos.

Los servicios básicos en Tamaulipas han tenido un desenvolvimiento positivo incrementándose década tras década en el número de viviendas que cuentan con estos servicios y además ha sido una mejora continua, pues a lo largo del periodo de estudio no se observan grandes saltos o caídas en el número de viviendas que posean estos servicios.

En cuanto al tipo de materiales utilizados para la construcción de techos, paredes y pisos, la tendencia general es que la calidad de las viviendas en Tamaulipas medida por el tipo de los materiales que se emplean ha ido aumentando, es decir cada vez más viviendas en Tamaulipas utilizan materiales resistentes para la construcción de techos, paredes y pisos.

Tamaulipas necesita de una urgente política estatal, encaminada a mejorar las condiciones de vivienda. De los indicadores con un menor porcentaje en las viviendas: ratio de propiedad, tamaño de la vivienda, porcentaje de viviendas con agua y porcentaje de viviendas que utiliza material sólido en sus techos.

Por último, la política también debe mejorar la forma de tenencia de la propiedad y en mejorar la calidad de vivienda de las familias. Si bien el estado tiene porcentajes altos en índice de viviendas por familia (99.82 por ciento), viviendas con energía eléctrica (99.20 por ciento), viviendas con piso diferente de tierra (98.32 por ciento), viviendas con drenaje (94.75 por ciento) y viviendas con paredes que utilizan materiales sólidos (94 por ciento), presenta también un porcentaje bajo en cuanto a viviendas con agua (89.45 por ciento), viviendas que utilizan materiales sólidos para la construcción de sus techos (87.91 por ciento). Siendo el porcentaje más bajo el obtenido en lo referente a la ratio de la propiedad (tenencia).

Referencias

- Centro de Investigación y Documentación de la Casa (CIDOC). (2010). Estado *Actual de la Vivienda en México 2010*. México, D.F. <http://www.cidoc.com.mx/esludiospdf/2010/EAVM-2010.pdf>
- Consejo Económico y Social de Naciones Unidas (ECOSOC). (2005). *Estudio del Relator Especial sobre una vivienda adecuada como elemento integrante del derecho a un nivel de vida adecuado*. <http://www.hic-al.org/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2000). *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/#Tabulados>
- _____. (INEGI). (2005). *II Conteo de Población y Vivienda 2005*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2005/#Tabulados>
- _____. (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/#Tabulados>
- _____. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Tabulados>
- Kunz, I. y Romero, I. (2008). Naturaleza y dimensión del rezago habitacional en México. *Economía, Sociedad y Territorio*, 8(26), 415-44.
- Medrano, P. (2005) *Tesis: Propuesta de un Modelo de Evaluación para Vivienda Social, bajo los parámetros de diseño universal, zonificación y flexibilidad*. Monterrey, N.L. México: ITESM Campus Monterrey, Programa de Graduados en Ingeniería.
- ONU-Hábitat. (2018). *Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos*.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). (2020). *Tu Índice para una Vida Mejor* (oecd.betterlifeindex.org)
- Rosahn, B. (1957). *La vivienda es más que un techo*. Bogotá, Colombia: Centro Interamericano.
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (Sedatu). (2019). *Criterios Técnicos para una vivienda adecuada*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/546559/Criterios_Vivienda_Adecuada.pdf
- Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). (1967). *El Problema de la Vivienda en Monterrey (Proyección de Necesidades y demanda efectiva 1980)*. Monterrey, N.L. México: Centro de Investigaciones Económicas.

La percepción del cambio climático en egresados ingenieros de educación superior en la zona Sur de Tamaulipas

*Nora Hilda González Durán¹
Juan Carlos Guzmán García²
Carlos Omar Sosa Del Ángel³*

Resumen

En esta investigación los ingenieros egresados expresaron que el cambio climático y su impacto en el medio ambiente es real y que su preparación en lo profesional dentro de las aulas de clase no fue suficiente con las materias proporcionadas por la universidad, tampoco el compromiso adquirido en el momento de ser ingenieros ya que se enfocan más en sus especialidades formativas para desarrollar su trabajo. Solo perciben esta problemática cuando son afectados directamente desde el entorno familiar. Solo cuando se habla de reciclaje de basura, emisiones de gases, desprendimiento de hielo, incendios forestales, etcétera, advierten los problemas reales que viven la sociedad y las empresas cuando enfrentan situaciones relacionadas con su responsabilidad medio ambiental. Esta investigación se realiza con un muestreo aleatorio no probabilístico, se aplica un instrumento para la recolección de datos e interpretación de estos. Podemos concluir que la percepción del egresado con relación al medio ambiente es poca además de que se necesita mayor compromiso de todos los involucrados de acuerdo con los resultados obtenidos.

Palabras clave: educación, ingenieros egresados, medio ambiente, percepción.

Antecedentes

El ser humano ha ocasionado daños en los ecosistemas de los que depende en gran parte el bienestar humano, y en algunos casos, ha llegado a amenazar la vida misma del planeta con el calentamiento global, mismo que se refleja en los océanos y la atmósfera principalmente, provocando cambios radicales o comportamientos

^{1 2 3} Profesor-Investigador, Universidad Autónoma de Tamaulipas. México, csosa@uat.edu.mx, jaguzman@docentes.uat.edu.mx, nhgonzale@docentes.uat.edu.mx

insólitos, desastres naturales o pandemias. Este cambio climático y sus efectos dramáticos representa un obstáculo al desarrollo global y especialmente a la capacidad de todos los países para alcanzar el desarrollo sostenible.

Ninguno de estos temas constituye preocupación en la enseñanza de la educación superior, específicamente en las diversas ingenierías.

La Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT) es una institución educativa de nivel superior y de carácter público con sede en Ciudad Victoria, Tamaulipas. Mantiene 26 campus en diferentes puntos del estado ubicados en, Reynosa, Río Bravo, Matamoros, Nuevo Laredo, Tampico, Ciudad Mante y Valle Hermoso contando con 19 ingenierías en total (s.f.).

En esta investigación nos enfocaremos en el Centro Universitario Sur que cuenta con 5 ingenierías. Otras universidades privadas como el Instituto de Estudios Superiores de Tamaulipas (IEST) cuenta con 4 ingenierías y la Universidad del Noreste (UNE) con 4. Ambas se ubican en la zona sur de Tamaulipas.

La UAT, IEST, UNE se han preocupado en la formación de los estudiantes teniendo como objetivo generar profesionistas integrales con conciencia social en el medio ambiente, impartiendo materias institucionales a nivel licenciatura, ejemplo de ello es la asignatura *Medio ambiente, Desarrollo sustentable responsabilidad social y Acción social* entre algunas más que se encuentra de manera transversal en todos los programas formativos, con la intención de desarrollar actitudes y aptitudes que permitan a los estudiantes interactuar de manera positiva en la ciudad y conservación del medio ambiente con respeto por la naturaleza para propiciar la sustentabilidad del planeta.

La percepción que tiene el ingeniero sobre su influencia en el medio ambiente cuando desarrolla su trabajo es en el sentido que cree que influye o es neutral. La realidad es que los ingenieros debieran buscar la transformación del planeta. Sin embargo, la ingeniería tiene relación con los ámbitos económicos, sociales y físicos. Incluso influyen en la conducta de distintas sociedades, incluso en ideologías de aspecto científico y tecnológicos. Por otro lado, y felizmente, cierto desarrollo tecnológico está ayudando a disminuir elementos contaminantes. El diseño de artefactos más livianos ha contribuido al control de minerales y contaminantes, ya que cada vez hay más la tecnología reduce el daño del medio ambiente. Como por ejemplo se refieren los automóviles eléctricos y los paneles solares en casas habitaciones, empresas, etcétera.

El papel del ingeniero y su relación con el medio ambiente ha sido un tema que hoy en día se ha vuelto más relevante ya que las universidades de la zona sur de Tamaulipas ofertan carreras relacionadas con el medio ambiente. Tendríamos que

cuestionarnos lo siguiente: ¿por qué estudiar una ingeniería?, ¿cuál es el objetivo de los ingenieros?

La educación universitaria debe otorgar a la sociedad recursos humanos preparados con principios fundamentales para que contribuyan a la sociedad o generen bienestar a la humanidad. Desde la perspectiva económica y social de esta manera se estaría atacando una problemática vigente, así como mostrar que la universidad está a la vanguardia y contribuye en la solución de los problemas que presentan la sociedad, el sector productivo, el gobierno a nivel federal estatal y el municipio.

Un ingeniero debe conocer los problemas que se presentan en el medio ambiente como la contaminación de las aguas, la acumulación de basura, la contaminación del aire, entre otros. Por ello, esta investigación se ubica en la percepción de los egresados de la UAT tomando como muestra la zona sur de Tamaulipas con información de primera mano de los estudiantes para conocer si fue suficiente su formación en esta área para participar en el sector productivo y la sociedad.

Desarrollo

La educación es la herramienta más efectiva para la construcción social, por lo tanto, es de suma importancia analizar su papel como herramienta socializante (González, 2010), “desde la universidad y como promotora de una cultura ambiental, permitiendo al ser humano introyectar un sistema de representaciones y comportamientos que sean congruentes con lo que se espera de él dentro del ámbito social”, tomando en cuenta la implicación del impacto ambiental del ejercicio de una profesión. De acuerdo con David Brancher (1983) “la ingeniería se ocupa de la producción y la construcción, y su base académica se encuentra en las ciencias físicas y naturales, la tecnología, la organización industrial y la economía”; sin embargo, estos deben incluir transversalmente la conciencia ambiental bajo la visión de los derechos humanos.

Al respecto, Calixto (2012) establece que la educación ambiental es un conjunto de estrategias pedagógicas que contribuyen a la formación de una conciencia sobre la responsabilidad del género humano, así como la formación de sujetos críticos y participativos ante los problemas ambientales. En este sentido, es necesario evaluar el impacto que ha generado en los estudiantes de ingeniería la percepción del cambio climático y como estos estudiantes identifican la importancia del ejercicio de su futura profesión con responsabilidad social y medioambiental.

Por consiguiente, la educación ambiental debe contemplar procesos históricos que relacionen el medio natural, el sistema cultural, la organización social, la base económica, y generar espacios de comprensión de aspectos sobre cosmovisión, epistemología, ontología y axiología de los orígenes y dinámicas de la cultura (Molina, 2002).

Esto impacta transversalmente al asignar las que conforman los programas de educación superior de ingenierías.

El sociólogo canadiense Guy Rocher (1990) conceptualiza la socialización como:

[...] el proceso por cuyo medio la persona aprende e interioriza, en el transcurso de su vida, los elementos socioculturales de su medio ambiente, los integra a la estructura de su personalidad, bajo la influencia de experiencias y de agentes sociales significativos, y se adapta así al entorno social en cuyo seno debe vivir.

Existe la socialización primaria y secundaria: en la primera se interiorizan aspectos básicos y en la segunda suministra al individuo las capacidades más específicas de ciertos sectores de su sociedad (Delval, 1999). Por lo tanto, de estos conceptos de educación y socialización, se consideran “agentes de socialización de las instituciones y los individuos que tienen las atribuciones necesarias para valorar el cumplimiento de las exigencias de la sociedad y disponen del poder suficiente para imponerlas” (Suriá, 2010), no debiendo perder la importancia de estos conceptos al generar políticas públicas educativas.

Como proceso interdisciplinario la educación ambiental permite:

[...] desarrollar ciudadanos e informados acerca del ambiente en su totalidad, en su aspecto natural y modificado; con capacidad para asumir el compromiso de participar en la solución de problemas, tomar decisiones y actuar para asegurar la calidad ambiental (Mrazek, 1996).

Por ello, los procesos de socialización deben orientarse hacia el cuidado del medio ambiente en cada una de las esferas del individuo.

El entendimiento del concepto de socialización permite comprender cómo la sociedad logra transmitir sus ideales, valores, creencias, y conductas aceptables a los individuos que forman parte del grupo social. Uno de los agentes socializadores importantes es la universidad, “pues el ingeniero deberá evaluar el problema y lo que pueda hacerse para resolverlo” (Brancher, 1983), con una perspectiva adecuada que permita una convergencia de los saberes sociales y ambientales que impactan el entorno de intervención ante el cambio climático.

La conciencia, es un producto social y, por ende, dependiente de las relaciones con otros. De aquí, surge la relevancia que tiene la enseñanza para el desarrollo del ser humano y sobre todo en la formación de profesionistas en las universidades. “Se trata de educar para desarrollar capacidades en las personas que las hagan competentes en un contexto social determinado” (Vila, 2010), logrando generar conocimientos aplicados que contribuyan a la transformación del entorno y contemplando la relación ser humano y el medio ambiente.

La educación formal abre un espacio para estimular al ingeniero en formación profesional, logrando en las aulas una reflexión que conlleve al pensamiento crítico sobre las problemáticas que enfrenta ante un mundo en constante cambio y pueda desarrollar investigaciones y proyectos comunitarios de atención como puede ser el cambio climático, la contaminación del agua, la disposición e residuos sólidos, el reciclaje, por mencionar algunos; pues como lo establecen Salgado y Sato (2012), “la diversidad biológica y cultural para que las sociedades se fortalezcan y resistan a un modelo capitalista que devasta las relaciones de los seres humanos entre sí y de éstos con su medio ambiente”, estas relaciones las podemos construir mediante la participación de estudiantes comprometidos con el medio ambiente con la motivación de ser agentes de cambio, pero debemos identificarlos y explotar sus capacidades. “Por consiguiente, es la sociedad en su conjunto y cada ámbito social en específico los que determinan ese ideal que la educación realiza” (Durkheim, 2012)”, y es la labor de las universidades lograr lo propio.

En este sentido, se busca construir el imaginario social del estudiante, entendiendo:

[...] la imaginación sociológica como la cualidad mental que le ayuda al individuo a usar la información y a desarrollar la razón para conseguir recapitulaciones lúcidas de lo que ocurre en el mundo y de lo que quizás esté ocurriendo dentro de él (Mills, 2003).

Formando estudiantes universitarios que tengan no solo una percepción del entorno ambiental, sino que se comprometan en la aplicación de las ciencias de la ingeniería en resolverlos. Pues como establece Bourdieu (2013), “lo que el mundo social ha hecho el mundo social puede, armado de ese valor, deshacerlo” y desde la universidad es necesario enseñar para transformar.

De acuerdo con Calixto (2012) “la educación ambiental puede generar y mantener nuevos comportamientos, actitudes, valores y creencias que impulsen el desarrollo social, productivo y creador; como consecuencia puede ser el medio para el logro de nuevas relaciones entre los seres humanos”. Por ello el entorno social debe favorecer aquello que se pretende enseñar.

“El objetivo de una ciudadanía educada es una meta de todos los agentes e instancias sociales” (Bolívar, 2007); en este sentido la educación ambiental fomenta la construcción de un nuevo tipo de conciencia que se le denomina *planetaria* (Morin, 2004) y es así que podemos desde las Instituciones de Educación Superior (IES), coadyuvar a tomar conciencia a través de asignaturas transversales y actividades extracurriculares que propicien el pensamiento crítico y la reflexión sobre la problemática que representa el cambio climático. De tal manera, que este estudio presenta un primer diagnóstico sobre la percepción de los estudiantes de ingeniería de la facultad, para que con los hallazgos se planteen estrategias basadas en evidencia.

Objetivo de investigación

Identificar cuál es la percepción de los egresados de ingeniería de la zona sur de Tamaulipas respecto a los cambios climáticos en el medio ambiente.

Diseño de investigación

Se desarrolló una investigación concluyente descriptiva para estudiar problemas actuales a través de la recolección de datos y describir la situación de una manera completa, así como aspectos y características del comportamiento del objeto de estudio. Al mismo tiempo se puede analizar, describir y explicar los hallazgos de la investigación. Se llevó a cabo un *muestreo no probabilístico* donde el investigador de acuerdo con su experiencia y juicio puede elegir una muestra de la población a estudiar. La muestra se calculó con la siguiente fórmula donde (la población $N =$ desconocida, proporción y no proporción se consideró 50% con un margen de error del 5% con un coeficiente de confianza de 95%) dando como resultado una muestra de 386.

$$n = \frac{Nz^2pq}{(N - 1)e^2 + z^2pq}$$

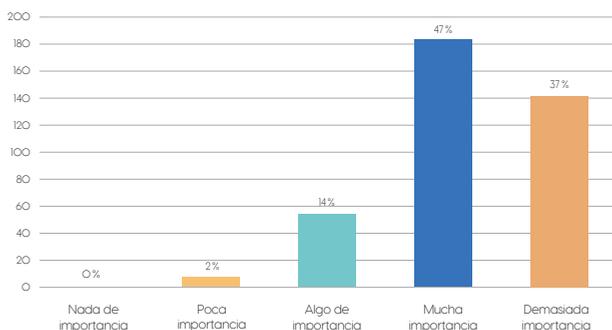
El método de muestreo no probabilístico que se aplicó a la investigación fue el *muestreo por conveniencia*, con una población disponible para el investigador. Dicha muestra es fácil de analizar ya que el investigador busca una proporción significativa de la población para tomar una decisión después de aplicar el instrumento que proporciona la información. Se utilizaron las escalas de tipo *nominal* (sin orden ni jerarquía) y de razón. Se relacionan los números o con nombres en donde se etiquetan, no necesariamente son de aspecto matemático. Las variables son descriptivas y la escala de razón puede ser cuantificada ya que nos maneja un orden de acuerdo con el objeto de los valores que se le da a cada variable. Se elaboró y aplicó un cuestionario de 10 preguntas a 386 egresados de ingeniería para recopilar información para llegar al objetivo de investigación.

Análisis de datos

Para conocer la percepción del cambio climático se formularon 10 preguntas de acuerdo con un número de opciones proporcionadas a 386 egresados de la UAT de la zona sur de Tamaulipas en el área de ingenierías. De los resultados de estas preguntas, se destaca:

Gráfica 1

Importancia del medio ambiente

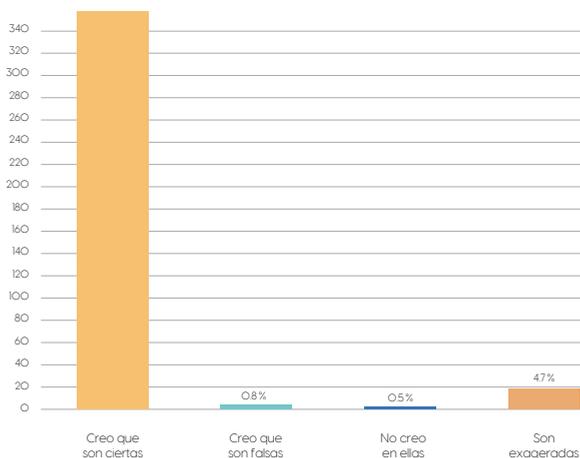


Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la gráfica, el 84% de los estudiantes de ingeniería encuestados le dan demasiada y mucha importancia al medio ambiente.

Gráfica 2

Riesgos del medio ambiente

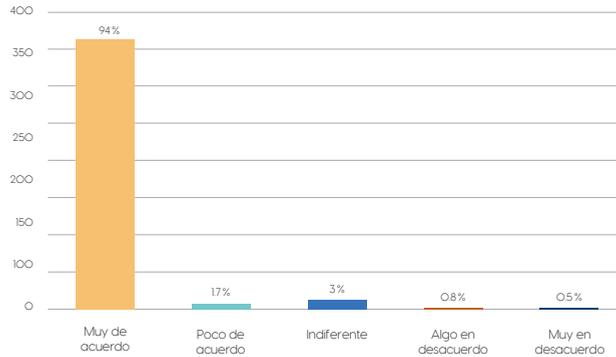


Fuente: elaboración propia.

Es esta gráfica se establece que el 94% de los ingenieros egresados consideran ciertas las advertencias sobre los riesgos que amenazan el medio ambiente y el 4.7 de los mismos refiere que son exageradas.

Gráfica 3

Problemas urgentes del medio ambiente

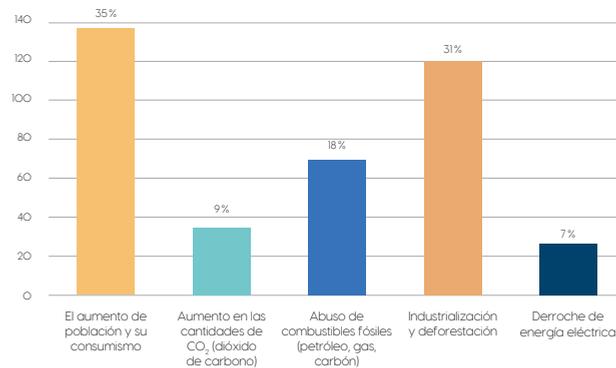


Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los datos, el 94 % de los egresados de ingeniería está muy de acuerdo en que el problema del medio ambiente es urgente.

Gráfica 4

Factores que influyen al cambio climático

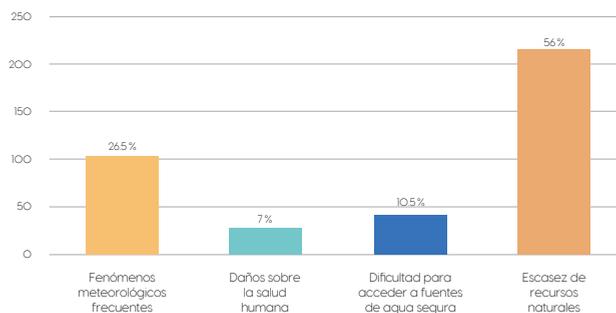


Fuente: elaboración propia.

En la gráfica que antecede se muestra que el 35% de los egresados de ingeniería considera que el principal factor que contribuye al cambio climático es el aumento de población y consumismo, por otro lado, el 31% señala que el principal factor es la industrialización y deforestación.

Gráfica 5

Consecuencias del cambio climático

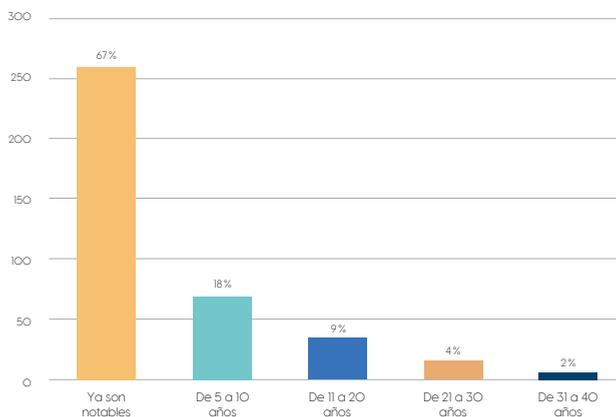


Fuente: elaboración propia.

Conforme a la gráfica, los egresados establecen dos principales consecuencias del cambio climático, por un lado, el 56% considera que propiciará escasez de recursos naturales y el 26.5% fenómenos meteorológicos frecuentes.

Gráfica 6

Tiempo de devastación del cambio climático

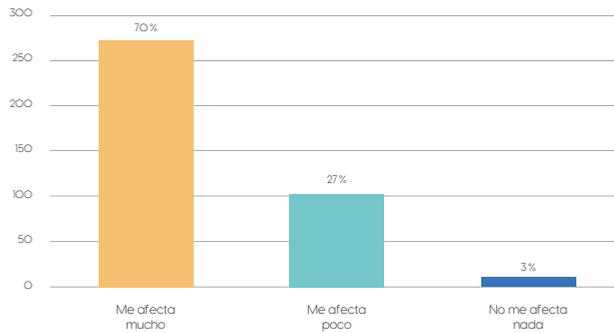


Fuente: elaboración propia.

Respecto al tiempo en que se manifestarán las consecuencias del cambio climático, el 67% considera que ya son notables y el 18% estima que tardarán de 5 a 10 años.

Gráfica 7

Afectación ante el cambio climático

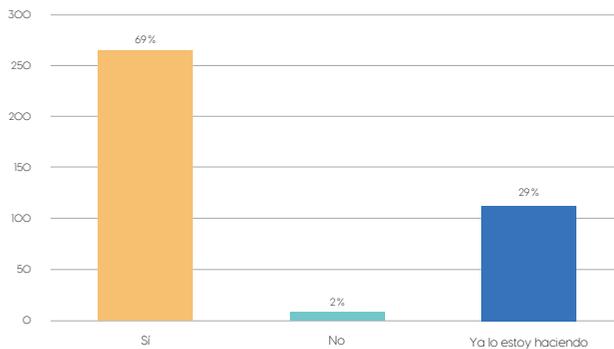


Fuente: elaboración propia.

Con relación a la afectación de las consecuencias del cambio climático y conforme a la gráfica, el 70% considera que afectan mucho y el 27% que afecta poco.

Gráfica 8

Egresado (frenaría el cambio climático)

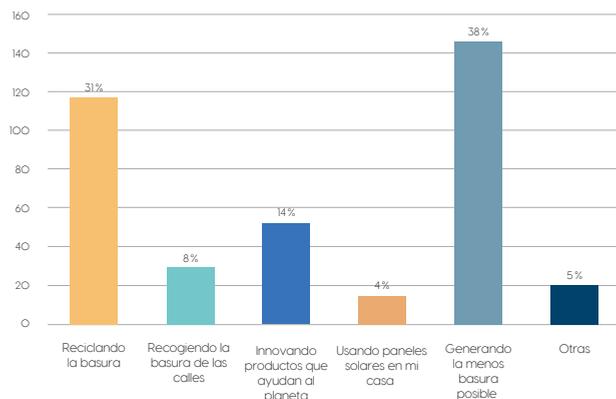


Fuente: elaboración propia.

De los egresados de ingeniería el 69% considera que harían algo para frenar el cambio climático y el 29% refiere que ya lo está haciendo.

Gráfica 9

Acciones para frenar el cambio climático

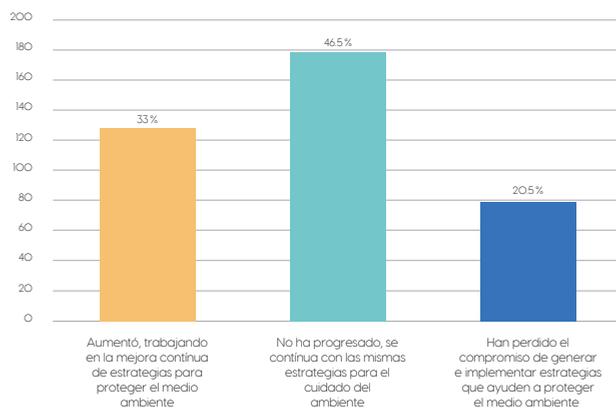


Fuente: elaboración propia.

Con respecto a la contribución o cómo contribuiría el egresado de ingeniería para frenar el cambio climático, el 38% refiere que generando la menor basura posible y el 31% reciclando basura.

Gráfica 10

Nivel de compromiso de los profesionistas



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica se muestra que el 46.5% que participó en la encuesta refiere que en los últimos 10 años el compromiso de los profesionistas no ha progresado y que

continúan con las mismas estrategias para el cuidado del ambiente, mientras que el 33 % refiere que han aumentado al trabajar en la mejora continua de las estrategias.

Conclusiones

Los egresados en el área de ingeniería de la UAT de la zona sur de Tamaulipas confían en los riesgos que se advierten sobre el equilibrio del ambiente. Las principales causas que ellos atribuyen del cambio climático son el aumento de población, además de la industrialización y deforestación, esto puede resultar en la escasez de recursos naturales, confirmando así que son notables las consecuencias. Además, la manera en que contribuyen a contrarrestar el cambio climático es a través del reciclaje de la basura y disminuyendo la generación de ésta. Finalmente, creen que no ha progresado el compromiso ecológico en los profesionistas, aunque existan los riesgos y advertencias, se continúa con las mismas estrategias para el cuidado del medio ambiente. Además, consideraron que en las instituciones a nivel superior no son suficientes las asignaturas cursadas para su formación medioambiental.

Referencias

- Bolívar, A. (2007). *Educación para la ciudadanía. Algo más que una asignatura*. España: Editorial GRAÓ.
- Bourdieu, P. (2013). Sociología y Democracia. En I. Jiménez (Comp.), Pierre Bourdieu capital cultural, escuela y espacio social (87-94). México: Siglo XXI.
- Brancher, D. (1983). *El medio ambiente y la enseñanza de la ingeniería. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura*. (UNESCO) ISBN 92-3- 301793-1.
- Calixto, F. (2012). Investigación en educación ambiental. *Revista Mexicana de Investigación Educativa (RMIE)*, 17(55), 1019-1033 (ISSN: 14056666).
- Delval, J. (1999). *Los fines de la educación*. México: Siglo XXI Editores.
- Durkheim, E. (2012). *Educación y Sociología*. México: Editores Coyoacán S.A. de C.V
- González, J. (2010). John Dewey y la pedagogía progresista. En J. Trilla (coord.), *El legado pedagógico del siglo XX para la escuela del siglo XXI*. México: Colofón.
- Mills, C. (2003). *La Imaginación Sociológica*. México: Fondo de la Cultura Económica.
- Molina, A. (2002). Conglomerado de relevancias y formación científica de niños, niñas y jóvenes. *Revista Científica del Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, (4), 187-200.
- Morín, E.(2004). *Tierra patria*. Buenos Aires: Visión.
- Mrazek, R. (1996). *Paradigmas alternativos de investigación en educación ambiental*. México: Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias-Universidad de Guadalajara.
- Rocher, G. (1990). *Introducción a la sociología general*. Barcelona: Herder.

- Salgado, A. y Michèle S. (2012). La percepción ambiental de los niños y adolescentes del “Quilombo” de Mata Cavalo (Mato Grosso, Brasil), en Raúl Calixto, *Experiencias latinoamericanas en educación ambiental*, México: CECYTEL NL-CAEIP.
- Suriá, R. (2010). *Socialización y Desarrollo Social. Psicología Social*. <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/14285/1/TEMA%202%20SOCIALIZACI%C3%93N%20Y%20DESARROLLO%20SOCIAL.pdf>
- Universidad Autónoma de Tamaulipas -UAT- (en línea). Oferta educativa. <http://uat.edu.mx/oferta-educativa>
- Vila, I. (2010). Lev S. Vygotsky: La psicología cultural y la construcción de la persona desde la educación. En J. Trilla (coord.), *El legado pedagógico del siglo XX para la escuela del siglo XXI* (pp. 207-227). México: Colofón.

Bases teóricas y marco de referencia para el sistema de señalamiento marítimo del Puerto Industrial de Altamira, Tamaulipas

Esperanza Martínez Cano¹

Gabriel Arcos Espinosa²

Dora María Esther González Turrubiates³

Héctor Manuel Sánchez García⁴

Resumen

En este capítulo se detallan las bases teóricas y el marco de referencia para el sistema de señalamiento marítimo del puerto de Altamira. Se mencionan los organismos internacionales que establecen y regulan los lineamientos de seguridad para la navegación segura en los puertos, entre ellos, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y la Organización Marítima Internacional (OMI), siguiendo con el Convenio Internacional para la *Seguridad de la vida humana en el mar*, el convenio (SOLAS). Se describen los aspectos que regula la Asociación Internacional de Autoridades en Señalización Marítima (IALA, en inglés). Posteriormente se hace una descripción de la infraestructura portuaria, desglosándose las principales definiciones de sus elementos. Así mismo, se especifica cómo se clasifican los puertos de México, para profundizar en las Administraciones Portuarias Integrales (API) Federales. Por último, se describe qué es la API de Altamira, así como las características del puerto en configuración, ubicación, operatividad, conectividad y áreas navegables. Con esto se pretende describir los elementos indispensables para hacer el marco de referencia correspondiente a un sistema de señalamiento seguro, de acuerdo con los lineamientos de los organismos internacionales que garantizan la seguridad de navegación en los puertos.

Palabras clave: señalamiento marítimo, Puerto Industrial de Altamira, Organización Marítima Internacional.

^{1 2 3} Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Tamaulipas, México

⁴ Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Portuaria, Marítima y Costera, CIDIPORT, UAT.

Organizaciones y convenios internacionales

La Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2020) se formó el 24 de octubre de 1945, con la aprobación de los 51 estados miembros que firmaron el documento de fundación. Hoy en día son 193 estados.

La Organización Marítima Internacional (OMI), (ONU, 2019) señala que es el organismo de las Naciones Unidas que se responsabiliza de la seguridad y protección de todo lo relacionado con la navegación, además de prevenir la contaminación de los mares por los buques. La OMI es la autoridad a nivel mundial que establece las normas para la seguridad, la protección y el comportamiento ambiental que han de seguirse por el transporte marítimo internacional. La principal función de la OMI es establecer un marco normativo para el transporte marítimo justo y eficaz que se debe adoptar y aplicar en el ámbito internacional.

Se pretende establecer un marco de igualdad de condiciones, esto con la finalidad de que los armadores de buques tengan disponible la manera de solucionar sus problemas financieros más allá de recortes presupuestables que afecten la seguridad de las embarcaciones y su tripulación.

De acuerdo con la OMI (2020) las disposiciones abarcan totalmente los ámbitos del transporte marítimo internacional “incluidos aquí el proyecto, la construcción, el equipamiento, la dotación, el funcionamiento y el desguace de los buques”, con la finalidad de garantizar que el sector siga siendo seguro, cuidadoso del medio ambiente y eficiente.

Adoptar un convenio significa la terminación de la primera etapa de un proceso largo que debe ser aceptado por los diversos gobiernos involucrados.

Los términos firma, ratificación, aceptación, aprobación y adhesión hacen referencia a diversos métodos a través de cuales un país puede externar su aprobación para aceptar un tratado.

Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar (SOLAS)

De acuerdo con la OMI (2020), el convenio denominado SOLAS se caracteriza como el más importante de todos los tratados internacionales relacionados con la seguridad de los buques mercantes. Apareció en 1914, a raíz de la catástrofe del Titanic, el transatlántico hundido en condiciones lamentables, la segunda versión es en 1929, la tercera de 1948, y la cuarta de 1960. En la versión de 1974, se incluyó un apartado mediante el cual las enmiendas adoptadas por la OMI entrarían en vigor en una fecha que se fijaría de antemano, siempre y cuando los estados no se opusieran.

El objetivo principal del convenio SOLAS vigente desde el 25 de mayo de 1980 es dar normas mínimas para la construcción, el equipo y el uso de los buques,

tomando en cuenta los referentes para su seguridad. Los países que abanderan a las embarcaciones son los responsables de asegurar que los buques que lleven su bandera acaten cabalmente las disposiciones que se establecen en el convenio SOLAS, de esta manera se asegura la expedición de certificados como evidencia de que se han cumplido todas las normas. Además, deben establecerse supervisiones por parte de los gobiernos contratantes de los buques. Si durante la inspección conocida como “supervisión por el Estado rector del puerto”, se encuentra que un buque y su equipo no cumple las normas del convenio, entonces no se aprobará su navegación. La versión más reciente se compone de disposiciones por las que se establecen obligaciones de carácter general y se acompaña de un anexo dividido en 14 capítulos.

Seguridad en la navegación

En el capítulo V, en el convenio SOLAS (2020) se señalan diversos servicios de seguridad de la navegación que deben proporcionar los gobiernos contratantes, y establece disposiciones de carácter operacional aplicables en general a todos los buques dedicados a toda clase de viajes.

Esto resulta un contraste considerando el convenio en su totalidad, que sólo es aplicable a ciertas clases de buques dedicados a viajes internacionales. Los temas de este capítulo comprenden el mantenimiento de servicios meteorológicos para buques; el servicio de vigilancia de hielos; la organización del tráfico; y la provisión de servicios de búsqueda y salvamento.

En ese mismo capítulo V se establece igualmente la obligación de los capitanes de barco de proporcionar ayuda a toda persona o navegación se encuentre en peligro. Así mismo se establece la obligación de los gobiernos contratantes de implementar todo tipo de medidas que garanticen que todos los buques llevan dotación suficiente y competente para prestar la ayuda y salvar la integridad.

IALA (International Association of Lighthouse Authorities)

La IALA (2019) es una organización no gubernamental que congrega los servicios de faros de la mayor parte de los países marítimos a nivel mundial. El objetivo primordial de la IALA (como lo establece el artículo 1º de su constitución), es: “Estimular el continuo progreso de las ayudas a la navegación, a través de diversos medios, para el movimiento seguro y expedito de las embarcaciones” (p. 56).

Otras finalidades de la IALA son efectuar conferencias técnicas y diálogos, así como recopilar y distribuir información referente a las autoridades de faros. Todo esto para promover y dar a conocer los avances técnicos de asistencia a los servicios

u organismos que la necesiten. Con esto se busca solucionar problemas técnicos o de organización en el campo de la señalización marítima mundial.

La Asociación IALA surgió a raíz de una serie de conferencias internacionales sobre Señalamiento Marítimo, que se realizaron desde antes la Segunda Guerra Mundial y después. La asociación se originó como iniciativa de algunos responsables de servicios de faros que querían continuar la labor de las conferencias y el intercambio de información en el campo de navegación marítima.

Categorías de miembros en la IALA:

- A. Categorías A y B: congregan a las principales autoridades de señalización marítima de cada país.
- B. Categoría de miembros asociados: se incluyen servicios responsables de las ayudas a la navegación, entre los cuales se encuentran las autoridades de puerto y organismos científicos cuya labor es de interés para IALA.
- C. Miembros industriales: son fabricantes de equipos de ayudas a la navegación y entidades que proveen servicio o supervisión técnica, con fines lucrativos.
- D. Miembros personal: son individuos competentes interesados en mantenerse al día en los desarrollos en la señalización marítima, y cuya actividad principal no es la de fabricante de equipos de ayudas a la navegación ni la venta de servicios o asistencia técnica.

Infraestructura portuaria

Definiciones

De acuerdo con lo descrito en Puertos y Marina Mercante (2020) referente a la ley de puertos y de la Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (2020) en el capítulo 1º, se define los siguientes términos como:

Puerto: El lugar de la costa o ribera habilitado como tal por el Ejecutivo Federal para la recepción, abrigo y atención de embarcaciones, compuesto por el recinto portuario y, en su caso, por la zona de desarrollo, así como por accesos y áreas de uso común para la navegación interna y afectas a su funcionamiento; con servicios, terminales e instalaciones, públicos y particulares, para la transferencia de bienes y transbordo de personas entre los modos de transporte que enlaza (p. 1).

Recinto portuario: La zona federal delimitada y determinada por la Secretaría y por la de Desarrollo Social en los puertos, terminales y marinas, que comprende las áreas de agua y terrenos de dominio público destinados al establecimiento de instalaciones y a la prestación de servicios portuarios (p. 1).

Terminal: La unidad establecida en un puerto o fuera de él, formada por obras, instalaciones y superficies, incluida su zona de agua, que permite la realización íntegra de la operación portuaria a la que se destina (p. 2).

Instalaciones portuarias: Las obras de infraestructura y las edificaciones o superestructuras, construidas en un puerto o fuera de él, destinadas a la atención de embarcaciones, a la prestación de servicios portuarios o a la construcción o reparación de embarcaciones (p. 2).

Servicios portuarios: Los que se proporcionan en puertos, terminales, marinas e instalaciones portuarias, para atender a las embarcaciones, así como para la transferencia de carga y transbordo de personas entre embarcaciones, tierra u otros modos de transporte (p. 2).

Sistemas portuarios: Un sistema portuario es un conjunto de elementos interrelacionados cada uno con una o varias funciones, y cuyos objetivos son participar en el aprovechamiento del litoral de una región o de un país, vinculando los transportes marítimo y terrestre (Octavio, 2011).

Clasificación de los puertos

De acuerdo con Octavio (2021), la Ley de Puertos clasifica los puertos y terminales marítimas de la siguiente manera:

- » Clasificación por su navegación:
 - Puertos de altura: esto son los que atiendan embarcaciones, personas y bienes, en navegación entre puertos y/o puntos tanto nacionales como internacionales.
 - Puertos de cabotaje: son los que solo atiendan embarcaciones, personas y bienes, en navegación entre puertos o puntos solamente nacionales.
- » Clasificación por sus instalaciones y servicios:
 - Comerciales: cuando se dedican en su mayor parte del tiempo, al manejo de mercancías o pasajeros en tráfico marítimo. Dentro de éstos, se podrán recibir embarcaciones de cabotaje y de altura, así como operar el tráfico comercial internacional; de igual forma, por sus características físicas entran en esta clasificación los dedicados al movimiento petrolero y granelero (se incluyen minerales y granos).
 - Industriales: cuando se dedican preponderantemente al manejo de bienes relacionados con industrias establecidas en la zona del puerto o terminal.
 - Pesqueros: cuando se dedican preponderantemente al manejo de embarcaciones y productos específicos de la captura y de proceso de la industria pesquera.
 - Turísticos: cuando se dedican preponderantemente a la actividad de cruceros turísticos y marinas.
 - Militares: destinados a la Secretaría de Marina para uso de la Armada de México.

» Clasificación por su uso:

- Públicos, cuando existe la obligación de poner las instalaciones a disposición de cualquier solicitante.
- Particulares: cuando el titular destine las instalaciones para sus propios fines y a los de terceros mediante contrato.

Sistema portuario en México

México, por su configuración geográfica, tiene una posición privilegiada con más de 11 000 kilómetros de litorales, con dos océanos a sus costados, el océano Pacífico y el océano Atlántico, además del privilegiado mar Caribe y el mar de Cortés. Contando entre sus fortalezas portuarias contar con un total de 117 puertos y terminales habilitadas para su uso (Puertos y Marina Mercante, 2020).

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2020), describe entre otros, los siguientes conceptos: la API nace cuando la planeación, programación, desarrollo y otras actividades relativas a bienes y servicios de un puerto, se delegan completamente a una sociedad mercantil, a través de la concesión para el uso, aprovechamiento y explotación de los bienes y la prestación de los servicios respectivos: “una API es autónoma en su gestión operativa y financiera, por lo que sus órganos de gobierno establecen sus políticas y normas internas”.

Un administrador portuario es el titular de una concesión para la API, y tiene dentro de sus facultades las siguientes:

- Planear, programar y ejecutar las acciones necesarias para la promoción, operación y desarrollo del puerto, o grupo de ellos y terminales, a fin de lograr la mayor eficiencia y competitividad.
- Usar, aprovechar y explorar los bienes del dominio público en los puertos o grupos de ellos y terminales, y administrar los de la zona de desarrollo portuario, en su caso.
- Construir, mantener y administrar la infraestructura portuaria de uso común.
- Opinar sobre la delimitación de las zonas y áreas del puerto.
- Formular las Reglas de Operación del Puerto, que incluirán entre otros, los horarios del puerto, los requisitos que deban cumplir los prestadores de servicios portuarios y, previa opinión del Comité de Operación, someterlas a la autorización de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).
- El administrador portuario se sujetará a un Programa Maestro de Desarrollo Portuario.
- El Programa Maestro de Desarrollo Portuario y las modificaciones sustanciales a éste serán elaborados por el administrador portuario y autorizados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), con

base en las políticas y programas para el desarrollo del sistema portuario nacional La SCT, con vista en el interés público, podrá modificar los usos, destinos y modos de operación previstos en el Programa Maestro de Desarrollo Portuario respecto de las diferentes zonas del puerto o grupo de ellos o terminales aún no utilizadas Si dichas modificaciones causaren algún daño o perjuicio comprobable al concesionario, éste será indemnizado debidamente.

El Sistema Portuario Nacional (SCT, 2020) está integrado por administraciones portuarias distribuidas de la siguiente manera.

Tabla 1

Administraciones Portuarias Integrales

| Administraciones Portuarias Integrales Federales | |
|--|-----------------|
| Altamira | Progreso |
| Coatzacoalcos | Puerto Madero |
| Dos Bocas | Puerto Vallarta |
| Ensenada | Salina Cruz |
| Guaymas | Tampico |
| Lázaro Cárdenas | Topolobampo |
| Manzanillo | Tuxpan |
| Mazatlán | Veracruz |
| Administraciones Portuarias Integrales Estatales | |
| Baja California Sur | Tabasco |
| Campeche | Tamaulipas |
| Quintana Roo | |
| Administraciones Portuarias Integrales Fonatur | |
| Cabo San Lucas | Huatulco |
| Administraciones Portuarias Integrales Privadas | |
| Acapulco | |

Fuente: Adaptado de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2020).

Para una representación gráfica de la ubicación y distribución del Sistema Portuario Nacional (ver Figura 1).

Figura 1

Sistema Portuario Nacional



Fuente: Página oficial Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Administraciones portuarias integrales federales

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2020, p. 1) señala que:

La Dirección General de Fomento y Administración Portuaria coordina el sistema a través del cual los negocios que promueven las 16 API Federales, son dirigidos y controlados por sus accionistas, sus consejos de administración y sus estructuras administrativas, definiendo reglas y procedimientos para la toma de decisiones en temas corporativos.

Administración Portuaria Integral Altamira

De acuerdo con el *Manifiesto de Impacto Ambiental Regional del año 2006 del proyecto Desarrollo Industrial y Recinto Portuario del Puerto Industrial de Altamira*, y con la Coordinación General de Puertos y Marina Mercante (2018) el puerto de Altamira comenzó actividades el 1º de junio de 1985 con infraestructura básica: una posición de atraque de 250 metros de longitud y 5 hectáreas de patios de almacenes. De esta manera se mantuvo un crecimiento sostenido que le permitió en su momento al puerto de Altamira, llegar a convertirse en uno de los cinco puertos más importantes

de México. Así mismo llegó a ser el único puerto industrial situado en el Golfo de México con grandes áreas para un futuro desarrollo portuario e industrial, esto sin dejar atrás la magnífica ubicación que tiene.

El gobierno federal en el año de 1993, establece nuevas estrategias operativas y administrativas en el ámbito portuario, surgiendo las API. La finalidad de las API va dirigida a la administración, operación, planeación, comercialización y desarrollo de la infraestructura marítimo-portuaria, bajo los lineamientos de la política de descentralización que se estableció en esa época.

La API de Altamira, bajo estos lineamientos descritos, inicia en 1995, el proceso de transferencia de las operaciones portuarias de los puertos en su totalidad, a la iniciativa privada, llevándose de una manera gradual, terminándose este proceso en 1996. De acuerdo con el Puerto Industrial de Altamira (API-Altamira, 2020), el proyecto se origina como parte del Programa Nacional de Desarrollo de Puertos Industriales, esto con la finalidad de desconcentrar el crecimiento industrial de las conglomeradas urbes del país, hacia nuevos y diversos polos estratégicos de desarrollo de México. De igual manera, para satisfacer la demanda de espacios para el comercio exterior para los estados situados en el centro y norte de México. Esto abarca una superficie total de 9595 hectáreas (ver Figura 2).

Figura 2

Puerto Industrial de Altamira

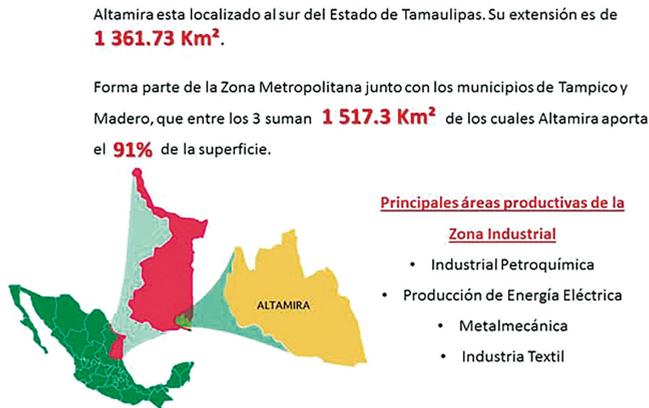


Fuente: página oficial Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Como se puede observar, el Puerto Industrial de Altamira tiene un gran potencial para crecimiento, esto gracias a su extensa reserva territorial y a su estratégica ubicación geográfica, en el sur del estado Tamaulipas. Este estado actualmente congrega una gran variedad de industrias y tiene una importante ventana abierta al comercio exterior al permitir la conexión con 125 puertos de todo el mundo, por medio de diversas compañías navieras de servicio de carga contenerizada y carga suelta de diversa índole (ver Figura 3).

Figura 3

Ubicación del puerto de Altamira



Fuente: Página oficial Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

El puerto de Altamira está conectado con la zona norte y centro de México, por lo que muchas de las ciudades más importantes del país, tales como Monterrey, Saltillo, Reynosa, Matamoros, San Luis Potosí, Guadalajara, León, Querétaro y la Ciudad de México, hacen uso los servicios de manera regular teniendo la disponibilidad de enlaces estratégicos en el ámbito carretero y ferroviario. Así mismo se cuenta con excelente logística debido a los servicios alternos que se ofrecen para la carga como para la embarcación misma durante sus operaciones (ver Figura 4 y Figura 5).

Figura 4
Enlaces carreteros



Fuente: página oficial Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Figura 5
Enlace ferroviario



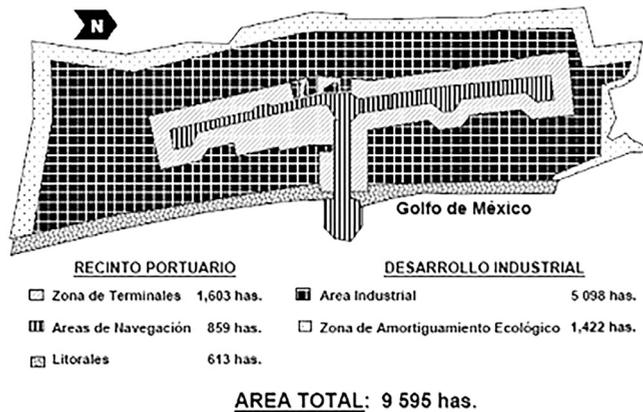
Fuente: página oficial Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Desarrollo del puerto de Altamira

El puerto de Altamira se encuentra en la última etapa de crecimiento descrita en la *Manifestación de Impacto Ambiental* en su modalidad regional del 2006, este documento forma parte del Plan Maestro de Desarrollo del Puerto de Altamira 2000-2010 que surge del Programa Nacional de Desarrollo de Puertos Industriales (ver Figura 6) (API-Altamira, 2020; Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2021).

Figura 6

Distribución de áreas, de acuerdo con el Programa Maestro de Desarrollo Portuario 2000-2010



Fuente: PMDP 2021.

Se sabe que el sur de Tamaulipas es una de las principales regiones de desarrollo económico de México, donde sobresalen los municipios de la zona conurbada (Tampico, Madero y Altamira). En Tampico se concentran actividades comerciales y zonas habitacionales de gran importancia; en Madero, se encuentra mayormente la actividad petrolera, sobresaliendo la refinación de hidrocarburos y para cerrar, en el municipio de Altamira, sobresale la actividad industrial; debido a todo lo descrito, el proyecto del puerto se conoce internacionalmente como “Altamira Complejo Industrial Portuario” (Rodríguez, 2006).

Plan Maestro de Desarrollo del Puerto de Altamira 2015-2020

Un Programa Maestro de Desarrollo Portuario (PMDP) 2015-2020, es un documento de consulta pública, elaborado por la API de un puerto, que garantiza una:

[...] eficiente explotación de los espacios portuarios, su desarrollo futuro y su conexión con los sistemas generales de transporte para identificar y justificar los usos, destinos y formas de operación de las diferentes zonas del puerto de conformidad con lo establecido en el artículo 41 de la Ley de Puertos (Puertos y Marina Mercante, 2020).

El PMDP del puerto de Altamira 2015-2020 “tiene como objetivo, establecer la planeación estratégica para que el puerto genere, de manera permanente y regular, una oferta eficiente de infraestructura y servicios portuarios que faciliten el traslado de bienes con el resto del país y el mundo” (SCT, 2015).

Configuración de áreas navegables de puerto de Altamira

De acuerdo con el PMDP de Altamira 2015-2020, en su año de construcción el canal tenía un calado “oficial” de 12.20 m (40 pies), contando con un total de 2 456 954 90 m² de áreas de navegación. El PMDP muestra el *Plano maestro de usos, destinos y modos de operación* del puerto de Altamira, donde se identifica y muestra la configuración final que tendrá una vez concluidas todas sus etapas, teniendo un total de 7 854 825.4516 m² en total de áreas navegables.

Figura 7

Áreas navegables del puerto de Altamira



Fuente: elaboración propia a partir del PMDP 2020 y la plataforma GoogleEarth.

Fundamento legal de la implementación de elementos de ayuda a la navegación

La implementación de todo tipo de elementos de ayuda a la navegación está regida por la normatividad internacional Asociación Internacional de Autoridades en Señalización Marítima por sus siglas en inglés IALA (2020), la cual tiene su fundamento en el convenio SOLAS (2020).

Normatividad internacional de sistema de boyado IALA

De acuerdo con la redacción del capítulo V del Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida en el Mar (SOLAS), en la regla 13 aparece una referencia explícita a las recomendaciones de la IALA que las hacen “cuasi-obligatorias” (ver Figura 8).

Figura 8

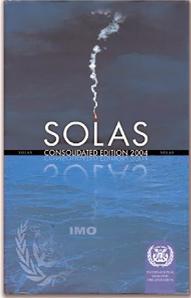
Reglamento del Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida en el Mar (SOLAS)

SOLAS CHAPTER V,
Regulation 13 – Consolidated edition 2004

Establishment and operation of aids to navigation

1. Each Contracting Government undertakes to provide, as it deems practical and necessary, either individually or in co-operation with other Contracting Governments, such aids to navigation as the volume of traffic justifies and the degree of risk requires.
2. In order to obtain the greatest possible uniformity in aids to navigation, Contracting Governments undertake to take into account the international recommendations and guidelines* when establishing such aids.
3. Contracting Governments undertake to arrange for information relating to aids to navigation to be made available to all concerned. Changes in the transmissions of position-fixing systems which could adversely affect the performance of receivers fitted in ships shall be avoided as far as possible and only be effected after timely and adequate notice has been promulgated.

* Refer to the appropriate Recommendations and guidelines of IALA and to SN/Circ.107, Maritime Buoyage System.



07

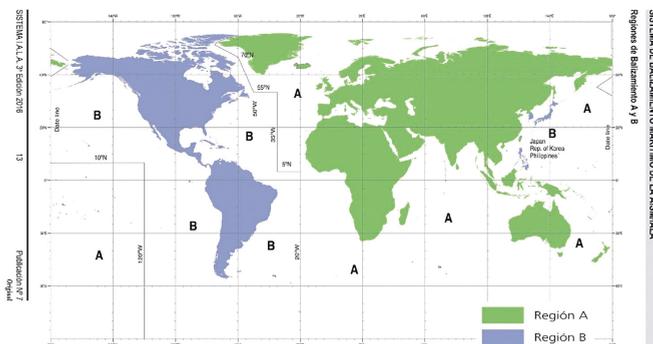
International Association
of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities

Fuente: Convenio SOLAS.

En México el señalamiento marítimo atiende las recomendaciones técnicas emitidas por la Asociación Internacional de Autoridades en Faros IALA; conocida también como Asociación Internacional de Señalización Marítima AISM; que es el organismo internacional oficial que regula todas las actividades del señalamiento marítimo a nivel mundial.

Figura 9

Mapa de zonificación IALA



Fuente: IALA (2020).

El señalamiento marítimo, dentro del sistema de balizamiento AISM, se divide en dos grandes regiones las cuales se denominan “A” y “B”. Dentro de esta regionalización, México se encuentra comprendido en la región “B”. Para efecto de este estudio se consideró lo establecido en sistema de balizamiento marítimo IALA específicamente para la zona B (ver Figura 9), que es la que corresponde a la zona de estudio donde se ubica el puerto de Altamira.

De acuerdo con IALA-AISM (2011) dentro del Sistema de Balizamiento Marítimo se establecen 6 tipos de señales que pueden utilizarse en forma individual o combinada. El navegante puede distinguirlas tomando como referencia la identificación de sus características. Las marcas laterales presentan diferencias entre las regiones de balizamiento A y B.

Tipos de señales

Una señal se define como “un elemento de ayuda que proporciona orientación para una navegación segura”. El Sistema de Balizamiento Marítimo, así como otras ayudas a la navegación establece los siguientes tipos de señales:

Señales laterales: utilizadas generalmente para canales bien definidos, asociados a un sentido convencional del balizamiento. Estas señales indican los lados de babor y estribor de la derrota que debe seguirse. En la bifurcación de un canal puede utilizarse una señal lateral modificada, para indicar el canal principal. Las señales laterales son distintas, según se utilicen en una u otra de las regiones de balizamiento (A y B), en la región B que es a la que pertenece el área de estudio deberá ser, rojo a estribor y verde a babor.

Señales cardinales: se utilizan asociadas al compás del buque, para indicar al navegante donde están las aguas navegables.

Señales de peligro aislado: para indicar peligros aislados de dimensiones limitadas enteramente rodeadas de aguas navegables.

Señales de aguas navegables: para indicar que las aguas son navegables a su alrededor, por ejemplo: señal de centro de canal.

Señales especiales: el objetivo principal no es señalar canales u obstrucciones, sino indicar zonas o configuraciones a las que se hace referencia en las publicaciones náuticas.

Otras señales: utilizadas para proporcionar información que sirva de ayuda a la navegación.

Sistemas tecnológicos de ayuda a la navegación. Sistema de Identificación Automática (AIS)

De acuerdo con la Asociación Internacional de Autoridades de Señalización Marítima y Ayudas a la Navegación (2014), el Sistema de Identificación Automática (AIS) “es un sistema de emisión de datos instalado en buques y estaciones terrestres, que trabaja en la banda marina de VHF”. Por sus características y capacidad este sistema se posiciona como una gran herramienta que permite mejorar el conocimiento del entorno, para contribuir a la seguridad de la navegación y a la eficiencia en la navegación del tráfico marítimo.

Una unidad AIS consiste en “un transceptor de radio VHF, capaz de enviar a otros buques y a receptores terrestres información de identificación de la estación, posición, rumbo, velocidad, eslora, tipo de buque, información referente a la carga, etc.”. Cuando se hace uso de una pantalla gráfica adecuada, el AIS de a bordo aporta información rápida, automática y exacta de un posible riesgo de colisión, calculando el Punto más Cercano de Aproximación (CPA) y el Tiempo hasta el Punto más Cercano de Aproximación (TCPA) tomando como base la información transmitida por otros buques cercanos de referencia (Asociación Internacional de Autoridades de Señalización Marítima y Ayudas a la Navegación, 2014).

El AIS es un complemento primordial de los sistemas de apoyo a la navegación existente. Los datos recepcionados por la vía AIS incrementan la información de que disponen los oficiales de guardia responsables en el puente de mando y de los controladores de los servicios de tráfico de buques.

Baliza de Radar (RACON)

Las balizas radar (Racon) “son dispositivos receptores/ transmisores que operan en las bandas de frecuencia del radar marítimo (9 y 3 GHz) que mejoran la detección e identificación de ciertos objetivos radar” (Asociación Internacional de Autoridades de Señalización Marítima y Ayudas a la Navegación, 2014).

Básicamente un Racon se activa con la presencia del radar de un barco enviando una señal de impulsos, como respuesta a esto, aparece una marca codificada (o algo semejante a “pintura”) en la pantalla principal del radar del barco, que señala el alcance y el rumbo del Racon. La “pintura” de pantalla puede ubicarse a una longitud especificada o puede basarse en la configuración del rango de radar y hace uso de un carácter tipo Morse para su identificación.

Aplicaciones

Como lo indica la Asociación Internacional de Autoridades de Señalización Marítima y Ayudas a la Navegación (2014), un Racon es una ayuda en la navegación

instalada en diversos sitios. El número de buques que pueden utilizar un Racon es ilimitado. Un Racon puede ser utilizado para los siguientes fines:

- Señalar tanto el alcance como la identificación de las posiciones en condiciones de hielo, inclusive en costas discretas.
- Identificar ayudas a la navegación, ya sea tanto marítima como terrestre.
- Identificar la línea de tierra.
- Ser el centro de indicación y punto de inflexión en las diversas zonas diversas o precaución o un esquema de separación del tráfico (TSS)
- Marcar diversos peligros.

Conclusión

Para realizar un proyecto de cualquier especialidad, es necesario tener en consideración los elementos técnicos y normativos que lo rigen, permitiendo con ello fundamentar dicha propuesta. Con la finalidad de establecer las bases técnicas de planeación a través de una metodología, se presentan los fundamentos en el tema de sistema de señalamiento marítimo, específicamente del puerto industrial de Altamira. Con esto se sientan las bases para poder desarrollar futuros proyectos de seguridad marítima portuaria.

Con la definición de los conceptos de infraestructura portuaria, la conformación del sistema portuario en México y la descripción de manera general de la configuración del puerto industrial de Altamira en cuanto a sus áreas navegables, se establece el origen y los fundamentos de la normatividad aplicable para el desarrollo de metodologías en materia de seguridad de la vida humana en el mar. Esta información puede ser tomada para evaluar, complementar y/o diseñar un sistema de señalamiento marítimo del puerto industrial de Altamira.

Referencias

- API-ALTAMIRA. (25 de feb de 2020). Página oficial. <https://www.puertoaltamira.com.mx/eps/0000202/acerca-del-puerto>
- Asociación Internacional de Autoridades de Señalización Marítima y Ayudas a la Navegación. (17 de Julio de 2014). Página oficial. http://www.puertos.es/Documents/IALA%20NAVGUIDE-ESP_2014%20DIMAR.PDF
- Asociación Internacional de Señalización Marítima. (5 de junio de 2019). Página Oficial. <https://www.iala-aism.org/about-iala/>
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (DOF 07-12-20). Diario Oficial de la Federación. Ley de Puertos. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/65_071220.pdf
- Coordinación General de Puertos y Marina Mercante. (2018). Administración Portuaria Integral de Altamira. S.A de C.V. Year Book 2018 Puerto de Altamira. API Altamira.

- <https://docplayer.es/87581696-La-edicion-puerto-altamira-yearbook-2011-publicada-por.html>
- _____. (2021). Programa Maestro de Desarrollo Portuario del Puerto de Altamira 2021-2025. <https://www.puertoaltamira.com.mx/upl/sec/PMDP2021-2025.pdf>
- Diario Oficial de la Federación. (22 de marzo de 2021). Puertos y Marina Mercante. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164182/02-LEYDEPUERTOS.pdf>
- IALA. (29 de enero de 2020). Página oficial. <https://www.iala-aism.org/about-iala/>
- IALA-AISM. (2011). *Sistema de Balizamiento Marítimo y otras Ayudas a la Navegación. España*. https://www.puertos.es/Documents/1-IALA-MBS_2010%20ES-PdE.pdf
- Ley de Puertos. (08 de junio de 2016). Diario Oficial de la Federación. México, México: Cámara de Diputados del H. Congreso de la unión.
- Octavio, E. (2011). *Conceptos generales, metodología, y sistema de control para la supervisión de obras de dragado marítimo en puertos*. México, D.F. y Ensenada, B.C.: UNAM.
- Organización de las Naciones Unidas. (15 de diciembre de 2019). *Naciones Unidas*. <http://www.imo.org/es/About/HistoryOfIMO/Paginas/Default.aspx>
- _____. (15 de enero de 2020). *Naciones Unidas*. <https://www.un.org/es/sections/about-un/overview/index.html>
- Organización Marítima Internacional. (20 de diciembre de 2019). Página oficial. <http://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/Home.aspx>
- _____. (5 de junio de 2019). Página Oficial. [http://www.imo.org/es/about/conventions/listofconventions/paginas/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-\(solas\),-1974.aspx](http://www.imo.org/es/about/conventions/listofconventions/paginas/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-(solas),-1974.aspx)
- _____. (15 de enero de 2020). Página oficial. http://www.imo.org/en/About/Documents/What%20it%20is%20Oct%202013_Web.pdf
- _____. (15 de febrero de 2021). Página oficial. <https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/Default.aspx>
- Puertos y Marina Mercante. (11 de mayo de 2020). Página oficial. <https://www.gob.mx/puertosymarinamercante/acciones-y-programas/programas-maestros-de-desarrollo-70555>
- _____. (15 de abril de 2021). Sitio oficial. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/html/wo83173.html>
- Rodríguez, M. (2006). *MLA regional*. Tampico, Tamaulipas.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (25 de febrero de 2020). Página oficial. Obtenido de <http://www.sct.gob.mx/puertos-y-marina/fomento-y-administracion-portuaria/apis-corporativo/>
- _____. (24 de febrero de 2020). Página Oficial. <https://www.gob.mx/fop/acciones-y-programas/administracion-portuaria-integral-api>

- _____. (24 de febrero de 2020). Sistema Portuario Nacional. <http://www.sct.gob.mx/puertos-y-marina/puertos-de-mexico/>
- _____. (2015). Programa Maestro de Desarrollo Portuario del Puerto de Altamira 2015-2020. México: SCT.
- SOLAS. (5 de febrero de 2020). Convenios. [https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\),-1974.aspx](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx)

El enfoque biocultural en la política climática de la 4T

José Clemente Rueda Abad¹
Oliver Mendoza Cano²

Resumen

El discurso del presidente López Obrador no contempla como uno de sus elementos el tópico del cambio climático, sin embargo, esto no significa que el gobierno mexicano lo haya sacado de su sistema nacional de planeación. Este documento, basado en un análisis de contenido y en un análisis del discurso, muestra que, aunque el tema no es un asunto prioritario en la agenda personal del presidente, sí se encuentra en diversos programas sectoriales, no solo en el ambiental, cumpliendo así con lo que dictan diversos instrumentos legales que rigen la administración pública federal y además de ello ha cambiado su enfoque de implementación con respecto a gobiernos.

Palabras clave: biocultura, cambio climático, Cuarta Transformación, política climática, sistema nacional de planeación

Introducción

Los datos más recientes sobre el cambio climático global señalan que la interferencia humana en el sistema climático es irrefutable; que los escenarios climáticos dependen de las acciones que se tomen en el presente para modificar la prospectiva documentada por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés), que en caso de no modificar el uso de combustibles fósiles la elevación de la temperatura podría superar los niveles pactados en el Acuerdo de París y eso podría llevar al mundo a un punto de no retorno aproximadamente en el año 2040.

¹ Programa de Investigación en Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, clementerueda73@gmail.com

² Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Colima, oliver@uocol.mx

Este capítulo tiene por objetivo responder las siguientes preguntas: en primer lugar, ¿las 14 secretarías que integran la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático cumplieron con el mandato legal de integrar el cambio climático en sus programas sectoriales sexenales? En segunda instancia, se busca saber si las políticas climáticas de la administración lopezobradorista cuentan con los recursos presupuestales que se etiquetan en el anexo denominado *Recursos para la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático* y, finalmente, considerando la modificación realizada, el 30 de noviembre de 2018, a la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal donde se le da a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales la tarea de formular e implementar no solo la política climática de la mencionada dependencia, sino la de todas las secretarías que conforman la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, en ese sentido se busca saber, ¿cuál es el criterio y orientación de la Semarnat y si el enfoque de la misma se ve reflejado en el resto de los programas sectoriales? En ese tenor se busca entender si los conjuntos de políticas climáticas reflejan un grado de coordinación institucional o lo que hay es desarticulación.

Esta aportación no defenderá en ningún momento el nacionalismo fósil del presidente de la república, y sí tiene como objetivo documentar el hecho de que, en México, a pesar de que el jefe del estado no lo tenga en su agenda, sí existe una política climática, que se justifica e implementa de acuerdo a lo que dicta la Ley General de Cambio Climático (artículo 65) (Cámara de Diputados, 2020, p. 34) y la Ley Nacional de Planeación (artículo 2 y 3) (Cámara de Diputados, 2018, pp. 1-2) y la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal (Artículo 32Bis, Fracciones XVI y XXXIV) (Cámara de Diputados, 2021, pp. 27 y 29).

Este capítulo se conforma de tres elementos: en el primero de ellos, se describen las herramientas analíticas utilizadas para la construcción de este documento. En la segunda sección, se articulan los datos encontrados en los programas sectoriales de la actual administración y que forman la política climática y se vinculan con el marco legal vigente que les da sustento. Finalmente, se analizan los criterios teóricos de las regiones bioculturales en México y cómo estos podrían servir o no para la política climática actual.

Este documento, entre otras cosas concluye que la política climática de la actual administración existe a pesar del ambiguo posicionamiento del presidente de la república, pero persisten errores en el diseño que ya se habían documentado durante la administración de Peña Nieto, finalmente el enfoque de implementación supone no solo retos teóricos, sino de esquemas de gobernanza; ya que, la lógica de las regiones bioculturales conlleva la participación ciudadana en la conservación de la naturaleza.

Herramientas y métodos de análisis

Para la generación de los datos se usaron dos técnicas que ayudan a analizar la acción comunicativa, en este caso el actor comunicativo es el gobierno de México, que como parte de sus responsabilidades tiene tareas asignadas en materia climática derivadas de la Ley General de Cambio Climático.

En este caso, no se ha revisado todo el universo de dependencias del gabinete legal y ampliado, el universo de investigación se ha enfocado a las Secretarías de Estado que forman parte de la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático y dichas dependencias son: Medio Ambiente y Recursos Naturales, Salud, Relaciones Exteriores, Agricultura y Desarrollo Rural, Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano, Marina, Turismo, Energía, Hacienda y Crédito Público, Comunicaciones y Transportes, Economía, Gobernación, Educación y Bienestar. Los programas sectoriales que se han usado son las versiones publicadas en el Diario Oficial de la Federación (DOF).

El contenido de dichos documentos se analizó para identificar el contenido vinculado a la política climática, para ello se usaron como matrices semánticas los conceptos: cambio climático, adaptación, mitigación, calentamiento global. De acuerdo con Krippendorff, el análisis de contenido es “una técnica de investigación destinada a formular, a partir de ciertos datos, inferencias reproducibles y válidas que puedan aplicarse a su contexto” (1990, p. 28). El análisis mostró que las secretarías de Economía, Gobernación, Educación y Bienestar no tienen elementos que refieran al cambio climático.

Una segunda herramienta utilizada ha sido el análisis crítico del discurso, (van Dijk, 1999) que se usó para identificar el enfoque de la política climática nacional encontrando que el único enfoque transversal en materia climática es el que tiene la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el resto de las dependencias muestran enfoques de carácter sectorial. Aunque 10 dependencias de gobierno de la CICC tienen acciones puntuales en materia de cambio climático es relevante que la Semarnat tenga el enfoque transversal ya que depende del Secretariado Técnico del Sistema Nacional de Cambio Climático y es responsable de articular la política climática de las dependencias de gobierno.

La política climática de la Cuarta Transformación

De acuerdo con Gates, “la climatología nos indica por qué debemos cambiar de rumbo, pero no cómo hacerlo. Para ello, debemos recurrir a la ingeniería, la física, las ciencias ambientales, la economía y otras disciplinas” (2021, p. 209) en esa lógica se requiere de la participación de los gobiernos y su capacidad de crear políticas públicas e instrumentos legislativos que sirvan para implementar los mecanismos de

respuesta al cambio climático en los ámbitos nacionales. De acuerdo con Krugman, “la política climática es un ámbito en el que algunas personas intentan sinceramente entender cómo funciona el mundo” (2020, p. 342) y ese es básicamente el objetivo de esta sección: entender cómo ha sido la respuesta de la actual administración al cambio climático.

En la actual administración, en el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 (PND 2019-2024) no existe mención al cambio climático, la mitigación de gases de efecto invernadero o a la adaptación social, lo único que existe en la mención al desarrollo sustentable y tiene el enfoque derivado del Informe Brundtland (Presidencia de la República, 2019, p. 43). Este PND 2019-2024 fue redactado personalmente por el presidente de la república y no cumplió con el requisito de ser el resultado de los procesos de consulta ciudadana que mandatan los artículos 2 y 3 de la Ley Nacional de Planeación (Cámara de Diputados, 2018, pp. 1-2).

Como se menciona desde la introducción, la política climática mexicana existe en la administración de la Cuarta Transformación a pesar de que el discurso presidencial no lo considere como un asunto prioritario.

Para demostrar lo anterior, se revisaron los planes sectoriales sexenales de las Secretarías de Estado que integran la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. De las mencionadas dependencias los programas de las secretarías de Economía (DOF, 2020a), Gobernación (DOF, 2020b), Educación (DOF, 2020j) y del Bienestar (DOF, 2020d) mencionan el calentamiento global o el cambio climático o alguno de sus componentes como la mitigación o la adaptación (ver Tabla 1).

Las secretarías que tienen un enfoque o posicionamiento sectorial y al menos una línea de acción (ver Tabla 1) respecto al cambio climático son: Medio Ambiente y Recursos Naturales (DOF, 2020k), Salud (DOF, 2020n), Relaciones Exteriores (DOF, 2020f), Agricultura y Desarrollo Rural (DOF, 2020c), Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (DOF, 2020e), Marina (DOF, 2020h), Turismo (DOF, 2020i), Energía (DOF, 2020l), Hacienda (DOF, 2020m). Por su parte el Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2020-2024 (DOF, 2020g) no cuenta con un enfoque específico sobre la temática, pero sí tiene una línea de acción.

Como se desprende de la Tabla 2, cada una de las dependencias muestra un enfoque diferente sobre el cambio climático, por lo cual cada una manifiesta no sólo su posición respecto al problema, sino que esto demuestra que es un problema multifactorial que podría agravar la vulnerabilidad del país razón por la cual un conjunto de dependencias del gobierno federal, de acuerdo con la LGCC, trabajan de manera independiente en sus áreas de competencia.

Tabla 1*Elementos de la política climática en los programas sectoriales de la CICC*

| Dependencia | Objetivos prioritarios o posicionamiento institucional | Estrategias prioritarias | Líneas de acción | |
|-----------------------|--|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Semarnat | (DOF, 2020k, 21-22) | | 1.4.1. (DOF, 2020k, 91) | |
| | | | 1.4.2. (DOF, 2020k, 91) | |
| | | | 1.4.3. (DOF, 2020k, 91) | |
| | Objetivo prioritario 2. (DOF, 2020k, 91) | 2.1. (DOF, 2020k, 91) | | 2.1.1. (DOF, 2020k, 91) |
| | | | | 2.1.2. (DOF, 2020k, 91) |
| | | | | 2.1.3. (DOF, 2020k, 92) |
| | | | | 2.1.4. (DOF, 2020k, 92) |
| | | | | 2.1.5. (DOF, 2020k, 92) |
| | | 2.2. (DOF, 2020k, 92) | | 2.2.1. (DOF, 2020k, 92) |
| | | | | 2.2.2. (DOF, 2020k, 92) |
| | | | | 2.2.3. (DOF, 2020k, 92) |
| | | | | 2.2.4. (DOF, 2020k, 92) |
| | | | | 2.2.5. (DOF, 2020k, 92) |
| | | 2.3. (DOF, 2020k, 94) | | 2.3.1. (DOF, 2020k, 94) |
| | | | | 2.3.2. (DOF, 2020k, 94) |
| | | | | 2.3.3. (DOF, 2020k, 94) |
| | | | | 2.3.4. (DOF, 2020k, 94) |
| | | 2.4. (DOF, 2020k, 94) | | 2.4.1. (DOF, 2020k, 94) |
| | | | | 2.4.2. (DOF, 2020k, 94) |
| | | | | 2.4.3. (DOF, 2020k, 94) |
| 2.5. (DOF, 2020k, 94) | | 2.5.1. (DOF, 2020k, 94) | | |
| | | 2.5.2. (DOF, 2020k, 94) | | |
| | | 2.5.3. (DOF, 2020k, 94) | | |
| | | 2.5.4. (DOF, 2020k, 94) | | |
| | | 2.5.5. (DOF, 2020k, 94) | | |
| Salud | (DOF, 2020n, 59) | | 4.3.5. (DOF, 2020n, 52) | |
| SADER | (DOF, 2020c, 13) | | 3.2.1. (DOF, 2020c, 19) | |
| | (DOF, 2020c, 13) | | 3.3.1. (DOF, 2020c, 19) | |
| Sedatu | (DOF, 2020e, 20) | | 1.2.2. (DOF, 2020e, 21) | |
| | | | 3.2.1. (DOF, 2020e, 25) | |
| | | 3.3. (DOF, 2020e, 25) | 3.3.4 (DOF, 2020e, 25) | |

| Dependencia | Objetivos prioritarios o posicionamiento institucional | Estrategias prioritarias | Líneas de acción |
|-------------|--|--------------------------|---|
| | | 4.3 (DOF, 2020e, 27) | 4.3.1. (DOF, 2020e, 27) 4.3.2. (DOF, 2020e, 27-28) |
| SICT | | | 2.5.9. (DOF, 2020g, 24) |
| SRE | Eje 2. (DOF, 2020f, 21) | | 5.1.3. (DOF, 2020f, 28) |
| Semarnat | (DOF, 2020h, 3-4) | 5.3. (DOF, 2020h, 18) | 5.3.10. (DOF, 2020h, 19) |
| Sectur | (DOF, 2020i, 14) | | 2.1.3. (DOF, 2020i, 16) 2.1.4. (DOF, 2020i, 16) 2.1.7. (DOF, 2020i, 17) 4.1.3. (DOF, 2020i, 20) 4.1.5. (DOF, 2020i, 20) 4.1.8. (DOF, 2020i, 20-21) 4.1.9. (DOF, 2020i, 21) 4.1.10. (DOF, 2020i, 21) 4.2.5. (DOF, 2020i, 21) 4.2.6. (DOF, 2020i, 21) 4.2.8. (DOF, 2020i, 21) 4.3.2. (DOF, 2020i, 21) 4.3.3. (DOF, 2020i, 21) 4.3.4. (DOF, 2020i, 21) 4.3.6. (DOF, 2020i, 22) |
| Sener | (DOF, 2020l, 12) | | 1.6.2. (DOF, 2020l, 55) 4.1.2. (DOF, 2020l, 63) 4.5.3. (DOF, 2020l, 65) 4.5.5. (DOF, 2020l, 65) 6.4.7. (DOF, 2020l, 69-70) |
| SHCP | (DOF, 2020m, 42) | | 3.4.10 (DOF, 2020m, 51) 5.6.4 (DOF, 2020m, 59) 6.7.2 (DOF, 2020m, 64) |
| SE | (DOF, 2020a), | | |
| Segob | (DOF, 2020b) | | |
| SEP | (DOF, 2020j) | | |
| Sebien | (DOF, 2020d) | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2*Objetivo o enfoque sectorizado*

| Dependencia | Objetivo o enfoque |
|-------------|--|
| Semarnat | Es importante reconocer que el cambio climático no sólo tiene impactos en el ambiente; también alcanza distintas esferas de la sociedad, afectando la salud y comprometiendo la seguridad alimentaria, la disponibilidad y calidad del agua y el desarrollo de las actividades productivas. En este sentido, México es particularmente vulnerable a los impactos del cambio climático: se estima que alrededor del 68 % de la población y el 71 % de su Producto Interno Bruto (PIB) están expuestos a sus efectos negativos. Es por ello que las acciones encaminadas al combate del cambio climático tendrán un carácter urgente y será necesario fortalecer la acción climática a fin de que nuestro [...] país transite hacia una economía baja en carbono, a la par que su población, ecosistemas, sistemas productivos e infraestructura estratégica sean resilientes a los efectos de este fenómeno. (DOF, 2020k, 21-22) |
| Salud | México, es un claro reflejo de los efectos negativos de la “síndrome” global caracterizada por un incremento acelerado de la epidemia de obesidad y sus consecuencias (diabetes, riesgo cardiovascular, algunos tipos de cáncer, entre otras), el estancamiento en el combate a la desnutrición tanto calórica como de micronutrientes esenciales, así como por los efectos adversos del cambio climático cuya intensidad y frecuencia van en aumento. (DOF, 2020n, 59) |
| Sader | <p>El Programa Sectorial de Agricultura y Desarrollo Rural 2020-2024 está orientado a implementar las prácticas de producción sostenible en el sector frente a los riesgos agroclimáticos, fomentando procesos de producción sustentable, medidas de restauración y aprovechamiento de agroecosistemas, medidas de mitigación y adaptación al cambio climático y uso de energías limpias en los procesos productivos. (DOF, 2020c, 13)</p> <p>En 2017, sólo el 46.2 % de los productores agropecuarios realizaban al menos una práctica sustentable. Para alcanzar el bienestar general de la población y la autosuficiencia alimentaria, la producción de alimentos en el país deberá considerar criterios de sustentabilidad. Así, se propone que, para responder a las necesidades globales de adaptación a efectos climatológicos, el 75 % de los productores agropecuarios realicen al menos una práctica sustentable. Con este incremento se espera tener un sector primario más resiliente a los efectos del cambio climático. (DOF, 2020c, 13)</p> |
| SEDATU | Se fortalecerán las capacidades de las instituciones del sector para la coordinación en su implementación, impulsando con los gobiernos estatales y municipales acciones de mitigación y adaptación al cambio climático, que consideren la vulnerabilidad física de la estructura expuesta de la vivienda parte de la gestión integral de riesgos. (DOF, 2020e, 20) |
| SRE | Eje 2.- Desarrollo sostenible y combate al cambio climático. El Gobierno de México tiene un claro y firme compromiso con la Agenda 2030, la Agenda de Acción de Addis Abeba sobre financiación al desarrollo, y con el Acuerdo de París, como el marco para promover una visión transformadora que coloca la igualdad y dignidad de las personas en el centro y llama a cambiar nuestro enfoque de desarrollo, respetando el medio ambiente. El combate |

| Dependencia | Objetivo o enfoque |
|-------------|---|
| | decidido contra el calentamiento global y el cambio climático es una prioridad de la política multilateral de esta administración, mediante el fortalecimiento de la resiliencia comunitaria y el cumplimiento de compromisos internacionales. (DOF, 2020f, 21) |
| SEMAR | <p>Transversalmente, se buscará contribuir con el gobierno federal, a un desarrollo sostenible en materia social, económica, ambiental, cultural, educativa y de equidad de género, [...] comprometiéndonos a la conservación del medio ambiente, sostenibilidad de los mares y siempre responsables ante un cambio climático ineludible. (DOF,2020h, 3-4)</p> <p>Será prioridad en la presente administración, la protección eficaz y eficiente de los recursos y áreas naturales protegidas con los que cuenta el Estado mexicano a fin de conservarlos para una sustentabilidad adecuada y que puedan ser utilizados por las generaciones futuras, contrarrestar los efectos del cambio climático y principalmente, para mantener la base productiva del país y los procesos ecológicos esenciales. (DOF, 2020h, 4)</p> |
| SECTUR | El sector turístico es un gran generador de empleos y divisas que no debe poner en riesgo su desarrollo, por lo que se deberá fomentar la sostenibilidad, respetando los recursos naturales y culturales del país, la planeación territorial, generando mayores consideraciones de los ecosistemas y mejores medidas contra el cambio climático. (DOF, 2020i, 14) |
| SENER | El nuevo modelo de desarrollo energético debe dar respuesta a la problemática expuesta en el análisis previo, es decir, el logro de la autosuficiencia energética sostenible. Para ello es necesario aumentar las actividades de exploración de hidrocarburos, incrementar la infraestructura de hidrocarburos y petrolíferos y de capacidad de procesamiento en las refinерías, con la finalidad de disminuir la dependencia de importaciones y satisfacer la demanda de la economía mexicana con producción nacional, para reforzar la seguridad energética del país; así como para aumentar la generación de energía eléctrica, en particular con energías limpias, incorporándolas de forma ordenada a la matriz energética nacional y cumplir con los compromisos y metas establecidas en la LGCC, así como con la LTE en materia de cambio climático y reducción de emisiones. (DOF, 2020l, 12) |
| SHCP | Se fortalecerá el papel de la banca de desarrollo como instrumento de mitigación de riesgos, toda vez que se cuenta con recursos monetarios para atender su plan de acción y sus programas financieros. Sin embargo, cuando sus mercados de atención se ven afectados o vulnerados en términos económicos por fenómenos, como pueden ser climáticos, financieros, de salud, entre otros, ajenos a su operación, la banca de desarrollo como brazo financiero del Gobierno Federal, tiene facultades para brindar el apoyo necesario, a través de la creación y aplicación de programas y productos de financiamiento, en condiciones preferenciales, que permitan mitigar los efectos negativos generados, contribuyendo así a impulsar y/o reactivar la actividad e ingresos de las empresas o sectores afectados. (DOF,2020m, 42) |

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, en el contexto de los objetivos de este capítulo, la tabla muestra que la Semarnat no tuvo la capacidad institucional de colocar su criterio de acción o su enfoque en el resto de las secretarías que conforman la CICC, esto evidencia que hay un conjunto de políticas climáticas desarticuladas del enfoque bioclimático.

Como se menciona, líneas atrás, la política climática de la actual administración modificó su instrumentación. Tal y como se menciona en diferentes partes del Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2020-2024, un elemento central será la aplicación del enfoque biocultural:

Se requiere impulsar e incentivar regiones sustentables donde se proteja e impulse el uso sustentable del patrimonio biocultural del país, todo ello bajo el principio de producir conservando y conservar produciendo. El uso del enfoque agroecológico en las políticas y acciones que plantea la Semarnat, en coordinación con otras secretarías de estado, gobiernos estatales, municipios e instituciones vinculadas al sector, será clave para progresar hacia la recuperación de paisajes degradados, la protección del patrimonio biocultural y para el avance hacia una verdadera soberanía alimentaria (DOF, 2020k, p. 27).

México como país megadiverso, cultural y lingüísticamente hablando, dispone también de un enorme acervo de conocimientos y prácticas tradicionales, ancestrales y contemporáneas, que se han preservado y fortalecido al paso de numerosas generaciones en los pueblos originarios y comunidades que viven y habitan en las regiones de alta densidad biocultural. Esos saberes deben formar parte de los programas de acción territorial, regional y local, mediante procesos de diálogo para remontar la situación de exclusión en la que permanecen. Todos ellos serán fundamentales para conservar, usar sustentablemente y recuperar los ecosistemas y la biodiversidad en las distintas regiones del país (DOF, 2020k, p. 28). Relevancia del objetivo prioritario 1: Promover la conservación, protección, restauración y aprovechamiento sustentable de los ecosistemas y su biodiversidad con enfoque territorial y de derechos humanos, considerando las regiones bioculturales, a fin de mantener ecosistemas funcionales que son la base del bienestar de la población (DOF, 2020k, p. 38).

2.4.2.- Orientar y acompañar a los diferentes órdenes de gobierno en el diseño y desarrollo de instrumentos de política para la mitigación y adaptación con enfoque territorial basado en ecosistemas, visión comunitaria, bioculturalidad y sustentabilidad (DOF, 2020k, p. 94).

Parte del enfoque biocultural, también se encuentra en el Plan Sectorial de la Secretaría de Energía, donde se señala que los derechos de las comunidades originarias no deben ser vulneradas en nombre de la lucha contra el cambio climático:

Con la finalidad de cumplir con las metas de transición energética, la presente administración establece como objetivo prioritario “Eleva el nivel de eficiencia y sustentabilidad en el uso de las energías”, con un enfoque que contribuya a la mitigación de los efectos del cambio climático y garantice los derechos de los pueblos indígenas y otros grupos sociales asentados en las áreas en donde se llevan a cabo los proyectos energéticos, generando espacios para la consulta y participación en los proyectos de generación de energía bajo el principio rector del PND “No dejar a nadie atrás, no dejar a nadie fuera” (DOF, 2020l, p. 20).

Un elemento que puede ser contradictorio en el discurso del cambio climático tiene que ver con el uso de las energías fósiles, ya que en el Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2020-2024 se dice que “la defensa del petróleo como recurso estratégico se vuelve una base necesaria para la construcción de la sustentabilidad del país, y también para la construcción de una transición energética con inclusión social” (DOF, 2020k, 27).

Se dice que puede ser contradictorio tratar al petróleo como un recurso estratégico, sin embargo, México cuenta con dicha fuente de energía, pero la forma en que está articulado el discurso en cuestión es confusa; ya que, vincula el uso estratégico del petróleo para lograr la sustentabilidad cuando está demostrado que la quema de combustibles fósiles ha alterado el sistema climático. Incluso intentando entender el argumento dado por la Semarnat puede considerarse que “los combustibles fósiles desempeñan un papel tan fundamental en nuestra vida que resulta inconcebible que dejemos de usarlos de forma generalizada en el plazo de una década” (Gates, 2021, p. 249).

Un tercer elemento que confirma la política climática es la continuidad del flujo de recursos presupuestales destinados al cambio climático que en el periodo 2019-2021 suman \$165 283 652 109.00 MN (ver Tabla 3). De esos recursos el 65% se le atribuyen a la Comisión Federal de Electricidad, 13% a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, el 10% al Ramo 23 del Presupuesto de Egresos de la Federación denominado Provisiones Salariales y Económicas, 6% de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2% a la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano, el restante 4% lo conforma el presupuesto de las secretarías de Energía, Salud, Comunicaciones y Transportes, Seguridad y Protección Ciudadana, Educación Pública, Gobernación, Marina, Economía y de Turismo, además del Ramo 38 del PEF Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y el Ramo 47 del PEF Entidades no Sectorizadas (Pemex).

Es importante señalar que las secretarías de Educación, Economía y Gobernación han ejercido recursos etiquetados para cambio climático, aunque en sus programas sectoriales no cuentan con ninguna línea de acción en la temática.

Sin embargo, los recursos presupuestales ejercidos tendrán en su momento el mismo problema identificado durante el sexenio anterior cuando se realizó la *Evaluación estratégica del anexo transversal del presupuesto de egresos de la federación*, ya que la metodología de asignación presupuestaria para la elaboración de los anexos transversales, en el caso el denominado “recursos para la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático”, no se ha modificado, lo que significa que no es posible identificar con claridad cuantos recursos presupuestales se ejercen realmente por acción determinada en cada una de las dependencias.

Tabla 3

Recursos etiquetados para cambio climático del PEF 2019-a 2021

| Denominación | Monto 2019 | Monto 2020 | Monto 2021 | Total 2019-2021 |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Comisión Federal de Electricidad | 11 692 997 413 | 40 881 957 713 | 53 498 270 536 | 106 073 225 662 |
| Medio Ambiente y Recursos Naturales | 7 972 511 786 | 7 920 449 940 | 5 635 519 362 | 21 528 481 088 |
| Provisiones Salariales y Económicas | 3 824 938 000 | 4 000 000 000 | 8 927 349 813 | 16 752 287 813 |
| Agricultura y Desarrollo Rural | 9 911 188 523 | 218 706 025 | 1 452 373 | 10 131 346 921 |
| Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano | 2 084 659 275 | 1 056 289 039 | 6 068 048 49 | 3 747 753 163 |
| Energía | 826 560 314 | 625 906 270 | 368 209 397 | 182 0675 981 |
| Salud | 358 449 607 | 333 072 560 | 3 44189 989 | 1 035 712 156 |
| Comunicaciones y Transportes | 404 800 000 | 192 476 010 | 153 980 808 | 751 256 818 |
| Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología | 223 035 884 | 238031986 | 25 9103 342 | 720 171 212 |
| Seguridad y Protección Ciudadana | | 143 943 155 | 141 077 927 | 285 021 082 |
| Educación Pública | 69 487 180 | 83 997 765 | 86746701 | 240 231 646 |
| Gobernación | 193 167 300 | | | 193 167 300 |
| Entidades no Sectorizadas | 64 840 182 | 64 840 182 | 30 000 000 | 159 680 364 |
| Marina | 19 526 214 | 13 005 275 | 13 005 275 | 45536764 |
| Economía | 3 000 000 | | | 3 000 000 |
| Turismo | 622 300 | 640 969 | 65 0000 | 1 913 269 |
| Total | 39 125 536 166 | 55 883 843 012 | 70 274 272 931 | 165 283 652 109 |

Fuente: elaboración propia con información de SHCP (2018; 2019) y DOF (2020).

Durante el sexenio anterior, en lo que respecta a la cuestión presupuestal el proceso de evaluación concluyó, entre otras cosas, que:

Se recomienda a la CICC que, a través de su Secretariado Técnico, coordine, a partir del Presupuesto de Egresos de la Federación de 2018, los trabajos necesarios para vincular el PECC con el AT-CC -vigente y subsecuentes- con objeto de que todas las líneas de acción del PECC cuenten con una definición específica de recursos, e identifiquen el programa presupuestario al que pertenecen (INECC, 2017, p. 9).

El enfoque biocultural

El decreto por el que se aprobó el Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales fue publicado el 7 de julio de 2020 en el DOF, es decir durante la gestión de Víctor Manuel Toledo Manzur que duró del 27 de mayo de 2019 al 31 de agosto de 2020. Este dato es relevante porque Toledo es un académico e investigador de la Universidad Nacional Autónoma de México que en el año 2011 fue promotor y Coordinador fundador de la Red de Patrimonio Biocultural del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, esto significa que la incorporación de la biocultura en el programa sectorial, y que incide en la política climática, obedece a un encuadre teórico y analítico impulsado por quien fuera el titular de la dependencia.

Lo que se busca hacer en esta sección no es desacreditar el enfoque biocultural; ya que, su importancia esta fuera de toda duda. Lo que se pretende es poner en perspectiva algunos elementos o retos, que conlleva su implementación como criterio de política pública.

De acuerdo con Toledo y Barrera (2008) en México la riqueza biocultural radica en los territorios de los 62 grupos etnolingüísticos y sus 365 variantes lingüísticas que tienen presencia en todo el país, el problema con ello es que la política climática fue diseñada para implementarse en los tres niveles de gobierno y no en regiones bioculturales. En ese sentido, “las unidades territoriales del municipio y los límites de los estados poco coinciden con las de los pueblos indígenas.” (Boege, 2008, p. 55) Desde ese punto de vista, los únicos municipios que podrían implementar un enfoque biocultural sin problema serían los que cuenten con el 100% de población indígena, el reto es saber cuántos de ellos se rigen bajo el sistema de tradiciones y costumbres porque ello supone que no necesariamente ejercen la política pública municipal de acuerdo con los estándares del sistema nacional de planeación.

El patrimonio biocultural puede entenderse como:

[...] desglosamos el patrimonio biocultural de los pueblos indígenas en los siguientes componentes: recursos naturales bióticos intervenidos en distintos gradientes de intensidad por el manejo diferenciado y el uso de los recursos naturales según sus patrones culturales; los agrosistemas tradicionales; la diversidad biológica domesticada con sus respectivos recursos filogenéticos desarrollados y/o adaptados localmente. Estas actividades se desarrollan alrededor de prácticas productivas (praxis) organizadas bajo un repertorio de conocimientos tradicionales (corpus) y relacionando la interpretación de la naturaleza con ese quehacer, el sistema simbólico en relación con el sistema de creencias (cosmos) ligados a rituales y mitos de origen (Toledo et al., 1993, 2001) En las [...] regiones bioculturales se generan diversos paisajes entre vegetación natural y los agrosistemas a veces itinerantes de la actividad agrícola. (Boege, 2008, pp. 13-14)

De lo antes mencionado se desprende la riqueza e importancia de entender la cosmovisión de los pueblos indígenas y su relación con la naturaleza, sin embargo, existe un problema teórico y analítico con la definición; ya que:

Actualmente, Eckart Boege y Aida Castilleja están proponiendo al “patrimonio biocultural” como “lo nuestro” de las comunidades indígenas, como un acervo que les permite orientar un proyecto propio de vida comunitaria en la actualidad. En este sentido, Víctor Toledo y Narciso Barrera han hecho referencia a la relevancia de la “memoria biocultural” como un universo de posibilidades factibles de ser implementadas frente a los desafíos globales contemporáneos, con particular énfasis en la problemática ambiental. Luque et al., prefieren utilizar el término de “legado biocultural” como parte de la herencia de los pueblos, que les da identidad y sentido colectivo y que es factible de ser reutilizado en esquemas de [...] desarrollo sustentable comunitario. Micheline Cariño, en el estudio de los oasis de Baja California Sur, que son agroecosistemas de origen criollo y mestizo, considera pertinente el uso del término patrimonio biocultural más allá de la matriz cultural indígena. Recientemente en la Feria de los hongos silvestres, organizada por Ángel Moreno, se habló de “identidad biocultural” frente a una audiencia náhuatl (Luque et al., 2020, pp. 23-24).

Lo antes mencionado significa que esta área de estudio se encuentra en evolución y, aunque el objeto de estudio sea el mismo, la forma de definirlo, entenderlo y abordarlo generará matices epistémicos que habrían de analizarse. Incluso, imponer el enfoque y definición de los creadores de la Red de Patrimonio Cultural,

como criterio de política pública, implícitamente lleva el reto de ejercer la política ambiental y climática con un objeto (el patrimonio biocultural) que está en discusión y que se enfoca principalmente a los grupos y comunidades indígenas.

Recientemente, Azuara-García et al. (2020) en *El cambio climático en territorios bioculturales de México: una aproximación metodológico-territorial*, han señalado algunos de los retos a los que se enfrentan las comunidades originarias generadas o exacerbadas por el cambio climático. Los autores, señalan que

El estudio de la exposición, la sensibilidad, la capacidad adaptativa y la vulnerabilidad de las regiones bioculturales, debe aportar a la acción a nivel país para la gestión del riesgo climático, incentivando medidas de adaptación desde lo local y con un enfoque de creación participativa, que incluya los saberes locales y las tradiciones productivas que se han adaptado a lo largo del tiempo, conservando la riqueza biocultural, la diversidad biológica y productiva, así como el uso de los recursos de manera sostenible (Azuara-García et al., 2020, p. 69).

Como ya se mencionó, solo el Programa Sectorial de Medio Ambiente en la acción puntual 2.4.2. (DOF, 2020k, p. 94) y la estrategia prioritaria 2.5 (DOF, 2020k, p. 94) es donde se mencionan actividades para introducir la biocultura en la política ambiental y climática del país, sin embargo, no muestran la amplitud conceptual del reto que supone la vinculación de los saberes locales con el cambio climático y cómo transformarlos en política pública. Incluso las autoridades ambientales del gobierno federal podrían consultar obras como *Complejos bioculturales de México: bienestar comunitario en escenarios de cambio climático* (Luque et al., 2020) porque en dicho documento se encuentran los primeros diagnósticos de impacto, vulnerabilidad y capacidad de adaptación de las regiones bioculturales de México. En la mencionada obra, también se encuentra el diagnóstico de elevación de la temperatura para los 369 municipios que, en la primera Contribución Nacionalmente Determinada que fue entregada a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, fueron clasificados como los más vulnerables al cambio climático.

Dichos materiales, son fruto del diálogo de saberes entre los expertos en patrimonio cultural y de cambio climático, un enfoque que debería ser explorado por las autoridades para la implementación de las políticas ambientales y climáticas de este sexenio, o cuando menos eso señala el Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Conclusiones

La política climática de la actual administración existe a pesar del ambiguo posicionamiento del presidente de la república, ya que como se ha mostrado el tema climático aparece referido en los programas sectoriales de 10 de las 14 secretarías que conforman la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático.

Entre las cosas que deben ser destacadas, es que, aunque la Semarnat tiene la tarea de formular e implementar la política climática, su enfoque no se ve marcado claramente en el contenido de los programas de las otras dependencias, lo cual puede entenderse como una falta de articulación y coordinación interinstitucional sobre todo al inicio de sexenio.

Ante los cuestionamientos que se le han formulado al presidente la república en funciones, él ha dicho que el programa *Sembrando Vida* es el principal programa de gobierno que servirá para hacer frente al cambio climático. Sin embargo, como se muestra en el capítulo, la Secretaría del Bienestar que oficialmente es la encargada de implementar dicha acción de gobierno no cuenta en su Programa Sectorial con una sola referencia al problema climático. Esto último ha buscado ser ajustado; ya que a través del Programa Especial de Cambio Climático 2021-2024 se ha solicitado que la mencionada secretaría incorpore elementos de carácter climático al programa *Sembrando Vida* para que coincida el dicho presidencial con lo que el programa está realizando de manera formal (DOF, 2021, pp. 32 y 37).

En lo que se refiere a los problemas de diseño, lo mismo puede decirse del *Anexo para mitigación y adaptación al cambio climático* de los presupuestos de egresos de la federación en los años 2019, 2020 y 2021. Lo que se muestra es que en efecto hay secretarías que conforman la CICC que anualmente destinan recursos para el problema, sin embargo, la metodología para asignación de recursos sigue siendo la misma que se utilizó durante la administración de Peña Nieto, lo cual en el momento de evaluar el desempeño de la política climática será uno de los problemas transexenales en la materia.

Además, el enfoque de implementación de la política climática que fue diseñada por la Semarnat de la 4T, que se basa en la bioculturalidad, en principio no está reflejado en los programas sectoriales, pero, además, teóricamente se trata de un enfoque que aún se encuentra en proceso de discusión académica y, además, quienes diseñaron el enfoque biocultural de la Semarnat ya no se encuentran dentro de la administración pública.

Básicamente, se puede concluir diciendo que la política climática tiene problemas de coordinación, falta de enfoque y recursos presupuestarios que no podrán demostrar la eficacia de su instrumentación.

En ese sentido, por segundo sexenio consecutivo la evaluación de la política climática será negativa para la federación y para los mexicanos mientras la emergencia climática sigue avanzando en todo el planeta.

Referencias

- Azuara, G., Escandón, J., Medina, M., Vargas, R., y Ortiz, B. (2020). El cambio climático en territorios bioculturales de México: una aproximación metodológico-territorial en Luque, D., Gay, C. y Ortiz, B., (Coord.) *Complejos bioculturales de México: bienestar comunitario en escenarios de cambio climático*, México, BUAP, pp. 41-73.
- Boege, E. (2008). *El patrimonio biocultural de los pueblos indígenas de México*. INAH: Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas, 344 p.
- Cámara de Diputados. (2018). *Ley de planeación*. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 5 de enero de 1983. Texto vigente Última reforma publicada DOF 16-02-2018. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/59_160218.pdf
- _____. (2020). *Ley general de cambio climático*. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de junio de 2012. Texto vigente. Última reforma publicada DOF 06-11-2020. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_061120.pdf
- _____. (2021). *Ley orgánica de la administración pública federal*. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 29 de diciembre de 1976. Texto vigente. Última reforma publicada DOF 20-10-2021. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LOAPE.pdf>
- DOF. (2020a). *Programa sectorial de economía 2020-2024*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5595481&fecha=24/06/2020
- _____. (2020b). *Programa sectorial de gobernación 2020-2024*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5595526&fecha=25/06/2020
- _____. (2020c). *Programa sectorial agricultura y desarrollo rural 2020-2024*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5595549&fecha=25/06/2020
- _____. (2020d). *Programa sectorial de bienestar 2020-2024*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5595663&fecha=26/06/2020
- _____. (2020e). *Programa sectorial de Desarrollo Agrario, Territorial y urbano 2020-2024*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5595683&fecha=26/06/2020
- _____. (2020f). *Programa sectorial de Relaciones exteriores 2020-2024*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5596023&fecha=02/07/2020
- _____. (2020g). *Programa sectorial de Comunicaciones y transportes 2020-2024*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5596042&fecha=02/07/2020
- _____. (2020h). *Programa sectorial de Marina 2020-2024*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5596130&fecha=03/07/2020

- _____. (2020i). *Programa sectorial de Turismo 2020-2024*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5596145&fecha=03/07/2020
- _____. (2020j). *Programa sectorial de educación 2020-2024*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5596202&fecha=06/07/2020
- _____. (2020k). *Programa sectorial de medio ambiente y recursos naturales 2020-2024*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5596232&fecha=07/07/2020
- _____. (2020l). *Programa sectorial de energía 2020-2024*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5596374&fecha=08/07/2020
- _____. (2020m). *Programa Nacional de financiamiento del desarrollo 2020-2024*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5597864&fecha=05/08/2020
- _____. (2020n) Programa sectorial de salud 2020-2024. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5598474&fecha=17/08/2020
- _____. (2020). *Presupuesto de egresos de la federación para el ejercicio fiscal 2021*. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/PEF_2021_301120.pdf
- _____. (2021). *PROGRAMA Especial de Cambio Climático 2021-2024*. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634786&fecha=08/11/2021
- Gates, B. (2021). *Cómo evitar un desastre climático. Las soluciones que ya tenemos y los avances que aún necesitamos*. México, Penguin Random House.
- INECC. (2017). *Evaluación estratégica del Programa Especial de Cambio Climático 2014- 2018*. México, INECC, 112 p. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/261388/Informe_evaluacion_PECC_fin_al_limpio_1_.pdf
- Krippendorff, K. (1990). *Metodología de análisis de contenido. Teoría y Práctica*. Piados Comunicación
- Krugman, P. (2020). *Contra los zombis. Economía, política y la lucha por un futuro mejor*. México, Crítica
- Luque, D., Gay, C., Ramírez, E., y Escandón, J. (2020) Complejos Bioculturales y Cambio Climático: reflexiones conceptuales en Luque, D., Gay, C. y Ortiz, B., (Coord.) Complejos bioculturales de México: bienestar comunitario en escenarios de cambio climático, México, BUAP, pp.16-40.
- Presidencia de la República. (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024*, 63 p. <https://lopezobrador.org.mx/wp-content/uploads/2019/05/PLAN-NACIONAL-DE-DESARROLLO-2019-2024.pdf>
- SHCP. (2018). *Presupuesto de egresos de la federación 2019 Metodología para la elaboración de los anexos transversales recursos para la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático*. https://www.pef.hacienda.gob.mx/work/models/PEF2019/docs/Anexos/metodologia_cam_bioclimatico.pdf
- _____. (2019). *Presupuesto de egresos de la federación 2020 Metodología para la elaboración de los anexos transversales recursos para la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático*.

- https://www.ppef.hacienda.gob.mx/work/models/PPEF2020/docs/Anexos/metodologia_c_ambioclimatico.pdf
- _____. (2020). *Presupuesto de egresos de la federación 2021 Metodología para la elaboración de los anexos transversales recursos para la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático*. https://www.ppef.hacienda.gob.mx/work/models/PPEF2021/docs/Anexos/metodologia_c_ambioclimatico.pdf
- Toledo, V., y Barrera-Bassols, N. (2008). *La memoria biocultural. La importancia ecológica de las sabidurías tradicionales*. Barcelona: Icaria.
- van Dijk, T. (1999). *El análisis crítico del discurso*, *Anthropos (Barcelona)*, 186(septiembre- octubre 1999), 23-36. <http://www.discursos.org/oldarticles/El%20an%Elisis%20cr%EDti-co%20del%20discurso.pdf>

Tópicos selectos de ingeniería y ciencias ambientales de Roberto Pichardo Ramírez, Juana Treviño Trujillo, Julio César Rolón Aguilar, coordinadores, publicado por la Universidad Autónoma de Tamaulipas y Editorial Fontamara en diciembre de 2022. La revisión y diseño editorial correspondieron al Consejo de Publicaciones UAT.

