

Impluvium

Publicación digital de la Red del Agua UNAM
Número 22, Enero - Marzo 2023



GESTIÓN INTEGRAL DE SEQUÍAS

INTRODUCCIÓN



El planeta Tierra se encuentra en una grave crisis ambiental. Varios límites planetarios se encuentran más allá de la zona de incertidumbre y el cambio global -cambio climático + crecimiento poblacional + cambio en el uso del suelo + desertificación + otros factores- ha llevado a muchas regiones del mundo a situaciones insostenibles.

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), en su Sexto Informe, es terminante al señalar la responsabilidad del ser humano de la situación en que se encuentra el planeta, y advierte que los fenómenos

extremos, como sequías e inundaciones, se incrementarán en frecuencia e intensidad.

México, por su ubicación geográfica, está expuesto a estos dos fenómenos y su historia prehispánica, colonial, independiente y moderna está marcada por ellos. En los años recientes, es decir, de 2010 a la fecha, las sequías han impactado fuertemente muchas regiones del país. En particular, en los últimos tres años, varias ciudades se vieron obligadas a tomar medidas emergentes para paliar la situación de escasez. Desafortunadamente, en cuanto se presentan lluvias y se recuperan medianamente las fuentes de abastecimiento se olvidan

esas acciones y se espera la próxima sequía, sabedores de que esta se producirá.

Las sequías no son producto solamente de la ausencia de lluvia. De hecho, existen varios tipos: meteorológicas, hidrológicas, agrícolas, socioeconómicas, entre otras. Cada clasificación está determinada, además de por la falta de precipitación, por una inadecuada administración del agua -deficiente manejo de las presas o sobreconsecionamientos para diversos usos-, falta de infraestructura o decisiones de tipo político.

Establecer medidas de mitigación y adaptación a las sequías requiere profundos conocimientos científicos, decisiones políticas y los recursos necesarios para llevarlas a la práctica. En México, un destacado esfuerzo se llevó a cabo en el año 2012 con la creación del Programa Nacional contra la Sequía (PRONACOSE). El programa no terminó de consolidarse, pero la actual administración pretende reactivarlo.

En este número de **IMPLUVIUM** dedicado a la Gestión Integral de Sequías se analizan: los impactos de las sequías en las ciudades y el campo, así como

los mecanismos para enfrentarlos; una historia del PRONACOSE; los sistemas de monitoreo existentes; el empleo de tecnologías, como la Inteligencia Artificial, para el monitoreo, evaluación y pronóstico de sequías, con un ejemplo de aplicación para México; el uso de la tecnología satelital en la detección y monitoreo de sequías; y un estudio de caso en la atención de la sequía en Monterrey, Nuevo León.

Compartimos con agrado este número, esperando contribuir a un mejor entendimiento de este fenómeno hidrometeorológico con presencia creciente en nuestros territorios y a la toma de acciones de prevención y mitigación con sólidas bases científicas.

DR. FERNANDO J. GONZÁLEZ VILLARREAL
COORDINADOR TÉCNICO DE LA RED DEL AGUA UNAM

DR. FELIPE I. ARREGUÍN CORTÉS
CONSULTOR DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM



Impluvium es una publicación de la Red del Agua UNAM; puede ser reproducida con fines no lucrativos, siempre y cuando no se mutile, se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

Los artículos compartidos son responsabilidad exclusiva de los autores y no reflejan necesariamente la opinión de la Red del Agua UNAM o de sus miembros.

Comité editorial:

Dr. Fernando J. González Villarreal

Coordinador Técnico Red del Agua UNAM

M. en C. Jorge Alberto Arriaga Medina

Coordinador Ejecutivo de la Red del Agua UNAM

Mtra. Malinali Domínguez Mares

Coordinadora de Asesores de la
Dirección General del IMTA

Mtra. Ana Gabriela Piedra Miranda

Responsable de comunicación organizacional del
Centro Regional de Seguridad Hídrica
bajo los auspicios de UNESCO

Editor invitado:

Dr. Felipe Arreguín Cortés

Coordinador del Grupo de Análisis:

Cambio climático y riesgos hidrometeorológicos
de la Red del Agua UNAM

Diseño gráfico y formación:

Lic. Joel Santamaría García

Lic. Marie Claire Mendoza Muciño

Publicación digital de la Red del Agua UNAM.

Número 22, Gestión integral de sequías.

Enero - Marzo 2023

www.agua.unam.mx/impluvium.html

Impluvium es la publicación digital de divulgación de la Red del Agua UNAM, Año 9, No.22, Enero – Marzo 2023. Es una publicación trimestral editada por la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, a través de la Red del Agua de la UNAM, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Instituto de Ingeniería, edificio 5, Col. Copilco, Del. Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, Tel. (55)56233600 ext.8745, <http://www.agua.unam.mx/impluvium.html>, jarrriagam@iingen.unam.mx. Editor responsable: M. en C. Jorge Alberto Arriaga Medina. Reserva de Derechos al uso Exclusivo: en trámite., ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Red del Agua UNAM, M. en C. Jorge Alberto Arriaga Medina, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Instituto de Ingeniería, edificio 5, Col. Copilco, Del. Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México fecha de la última modificación, Abril 2023.

CONTENIDO

Introducción 2

Dr. Fernando J. González Villarreal

Dr. Felipe I. Arreguín Cortés

ARTÍCULOS

Impactos de la sequía en el campo y en las ciudades 7

David Ortega-Gaucin

¿Cómo enfrentar una sequía?. 14

Ramón Aguirre Díaz

El Programa Nacional Contra la Sequía, PRONACOSE 21

Felipe I. Arreguín Cortés

Sistemas de Monitoreo de Sequías 29

René Lobato Sánchez y José Guadalupe Rosario de la Cruz

Uso de la tecnología satelital en la detección y monitoreo de sequías 36

Moises Michel Rosengaus Moshinsky

Gestión de presas para el abastecimiento del sector agroalimentario ante el fenómeno de sequía 44

Kimberly Mendivil-García, Leonel Ernesto Amábilis-Sosa,
Adriana Roé-Sosa y Jhonatan Jesús Hermosillo-Nevárez



Biocarbón para reducir los efectos negativos de las sequías en cultivos de trigo del centro de México 52

Lenin Ejecatl Medina Orozco y Iván N. Medina Orozco

Breve conceptualización de la sequía hidrológica en México y la importancia de la resiliencia como herramienta para mitigar sus impactos 58

Analaura Sánchez Méndez

Un estudio de caso: La atención de la sequía en Monterrey, Nuevo León 65

José Mario Esparza Hernández

Hacia una gestión integral de recursos hídricos ante sequías para la ZMVM: Enfoque transdisciplinario desde la complejidad 71

Norma Elizabeth Olvera Fuentes y Carlos Gay García

La inteligencia artificial en el monitoreo, evaluación y pronóstico de sequías: Un ejemplo 78

José C. Douriet, Aldo I. Ramirez y Andrés C. Ravelo



IMPACTOS DE LA SEQUÍA EN EL CAMPO Y EN LAS CIUDADES

DAVID ORTEGA-GAUCIN
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA



Resumen

La sequía es un fenómeno climático que se caracteriza por una disminución significativa de la cantidad de lluvia durante un período prolongado de tiempo. Este fenómeno puede ocasionar graves impactos en las zonas rurales y urbanas que, por la naturaleza específica de las actividades que se realizan en ellas, suelen ser diferentes en cada caso. Por ello, el objetivo del presente artículo es esclarecer de manera concisa, cuáles son los principales impactos de la sequía en el campo y en las ciudades.

Introducción

La sequía es uno de los fenómenos naturales que más afectan a las personas, porque el agua es un elemento indispensable en muchas de las actividades diarias. Se necesita agua para las personas, las plantas y los animales; para producir alimentos; y para desarrollar actividades cotidianas como lavar los platos, cocinar, bañarse, nadar o hacer actividades recreativas. El agua también se utiliza para producir gran parte de la electricidad. Cuando no hay suficiente agua para estas actividades debido a una sequía, las personas y sus actividades se ven afectadas de distintas maneras. Cada una de las dife-

rentes formas en que la sequía afecta se denomina impacto.

Las sequías pueden tener distintos impactos económicos, sociales y ambientales, dependiendo de la severidad del fenómeno y de la vulnerabilidad de los sistemas afectados. Sin embargo, debido a la naturaleza intrínseca de las actividades que se realizan en el campo y en las ciudades, los impactos de la sequía son diferentes en cada ámbito, así como también la percepción que se tiene del fenómeno. Por un lado, los campesinos que cultivan la tierra en condiciones de temporal, es decir, sin riego, suelen ser los primeros afectados por la sequía, pues el agua de lluvia es indispensable para la producción de alimentos. Por tal motivo, para ellos es preocupante ver un cielo sin nubes en temporada de lluvias, ya que es un indicio de que se tendrá un año difícil, de bajas cosechas, y anhelan la lluvia porque de ella depende su subsistencia y la de sus familias (Velasco et al., 2005). En cambio, los habitantes de la ciudad resultan, por lo general, menos afectados y son menos sensibles a la sequía, pues no la perciben hasta que comienza a faltar el agua que reci-

ben en sus hogares, lo cual sucede cuando la sequía ya está muy avanzada. Este problema de percepción es debido a que el impacto de las sequías en las ciudades no es directo, sino que se ve influido por dos factores: la infraestructura hidráulica y la gestión urbana del agua (Pineda-Pablos y Salazar-Adams, 2016).

En cualquier caso, ya sea en el campo o en las ciudades, la sequía produce impactos notables y acumulativos, es decir, tienen un comportamiento similar al de las fichas de dominó que se colocan en posición vertical una tras otra para después provocar su caída en cadena (NDMC, 2023). Evidentemente, cuanto más tiempo dure la sequía, mayores serán los efectos negativos de la escasez y la falta de agua provocadas por el fenómeno.

Impactos de la sequía en el campo

Los habitantes del medio rural son los más vulnerables a las sequías, debido a que un alto porcentaje de la población rural carece de los servicios básicos de agua y saneamiento en sus hogares y, por ende, no disponen de la cantidad suficiente y con-

tinua para sus actividades diarias. Además, generalmente se dedican a la agricultura y la ganadería, dos actividades económicas que implican un alto riesgo ante la presencia de sequías, pues el sector agropecuario en su conjunto es el que mayor agua demanda y consume.

La agricultura de temporal es, por lo general, la primera actividad productiva afectada por la sequía, debido a la dependencia que tienen los cultivos a la precipitación y a las reservas de humedad del suelo. Este tipo de agricultura es practicada por campesinos de bajos recursos económicos y son ellos los primeros en la sociedad en sentir los efectos de la sequía. Son pequeños productores que, con la ayuda de un equipo sencillo, su propio trabajo y el de sus familias, producen esencialmente para autoconsumo. Cuando ocurre una sequía, sus cosechas no logran germinar o se marchitan y mueren (Figura 1). No pueden recoger una cosecha, lo que representa el primer paso hacia el desastre (Gill, 2008).

Por otro lado, la agricultura de riego es imposible si no se cuenta con fuentes de abastecimiento de



Figura 1. Pérdida de cultivos de temporal provocada por la sequía en Guerrero. Fuente: Vania Pigeonutt (El Universal, 28 de agosto de 2015).

agua como pozos, presas y ríos. Por ello, cuando hay escasez del recurso se genera un efecto negativo en la producción, los ingresos y el nivel de vida de los agricultores. Esto conduce también a la importación de productos y a un aumento de los precios en el mercado, además de que la infraestructura productiva se degrada, entre otros efectos (Ortega-Gaucin, 2012).

La sequía también afecta de manera significativa a la actividad ganadera, especialmente a la práctica de la ganadería extensiva. En esta actividad, los primeros efectos se manifiestan en la escasez de agua para abrevadero y en la reducción del forraje disponible. Posteriormente, se observa una disminución en la producción de los animales, lo que se refleja en su peso, tasas de reproducción y producción de leche. En casos graves, la falta de agua ocasionada por la sequía disminuye la fuerza y vitalidad de los animales, lo que incluso puede conducir a su muerte por deshidratación o inanición (López et al., 2010).

Impactos de la sequía en las ciudades

El impacto de la sequía en las ciudades se manifiesta principalmente por la reducción del agua disponible para las actividades cotidianas como la limpieza, la higiene personal y el saneamiento (Figura 2). En períodos de sequía es común que se implementen medidas de racionamiento de agua para asegurar el consumo humano. Además, la escasez de agua puede hacer que los precios se

incrementen, afectando la economía de las personas y las empresas. Por otro lado, cuando el nivel de agua disminuye en los embalses o cuerpos de agua que abastecen a las ciudades, la calidad del agua también puede disminuir, lo que afecta la salud de las personas que la consumen.



Figura 2. Habitantes de la zona metropolitana de Monterrey hacen fila para recibir agua ante la escasez del líquido provocada por la sequía. Fuente: Julio César Aguilar (CNN, 8 de junio de 2022).

Desde el punto de vista económico, las empresas y fábricas que dependen del agua para sus procesos de producción deben reducir sus operaciones como resultado de la escasez del recurso provocada por la sequía, experimentando bajas en la producción y pérdida de empleos. Asimismo, muchas plantas de energía dependen del agua para generar electricidad, por lo que, si el nivel de agua disminuye, la producción de energía también se reduce.

La sequía puede tener impactos en la salud de las personas, como la deshidratación y la propagación de enfermedades relacionadas con el agua. Igualmente, ocasiona mermas en la calidad del aire. Cuando llueve poco, se concentran las partículas suspendidas en la atmósfera como el dióxido de carbono, el polen y los clorofluorocarbonos. Estas sustancias pueden irritar los bronquios y los pulmones, provocando o empeorando las enfermedades respiratorias como el asma, la bronquitis y la neumonía bacteriana (CDC, 2023). Finalmente, la sequía puede afectar la flora y fauna de las ciudades, ya que los árboles, las plantas y animales dependen del agua para sobrevivir.

Aunque muchas ciudades han sufrido la sequía en los últimos años, no existe una conciencia generalizada entre los habitantes y los responsables de los organismos operadores de agua potable sobre el impacto que tiene este fenómeno o la necesidad de prevenir sus efectos. Se tiende a ver a la ciudad como un entorno separado de la naturaleza, pero en realidad el sistema de suministro de agua potable y saneamiento de las ciudades está estrechamente relacionado con el medio ambiente circundante (Kaica, 2005). Las fuentes de agua para el abastecimiento provienen del ambiente y las aguas residuales regresan al mismo, por lo que se deben implementar medidas para hacer una gestión integrada del agua, que incluya el tratamiento y reúso de las aguas residuales.

Conclusiones

La sequía puede tener impactos significativos en el campo y en las ciudades, afectando la producción agrícola, la disponibilidad de agua potable, la salud del ganado y la fauna silvestre, la economía y el empleo, la calidad del aire y la biodiversidad.

Para reducir los impactos de la sequía en el campo es importante implementar medidas que promuevan la conservación del agua, fomenten la innovación en la gestión del recurso, mejoren la eficiencia en su uso, y promuevan la agricultura sustentable y la diversificación de cultivos. En las ciudades, se pueden reducir los impactos de la sequía mediante la promoción del ahorro del agua, los sistemas de captación de agua de lluvia, la mejora de la eficiencia de los sistemas de distribución, el tratamiento y reúso del agua, y la promoción de la innovación en la gestión del recurso. En general, para reducir los impactos de la sequía, es importante adoptar un enfoque integral que involucre tanto la gestión de la oferta como la de la demanda, además de fomentar la adaptación al cambio climático y promover la colaboración entre los diferentes actores involucrados en la administración de los recursos hídricos. 🔥

Referencias

- CDC [Centers for Disease Control and Prevention] (2023). Health implications of drought. <https://www.cdc.gov/nceh/drought/implications.htm>
- Gill, R. B. (2008). *Las grandes sequías mayas. Agua, vida y muerte*. México, D.F.: FCE.
- Kaica, M. (2005). *City of flows. Modernity, nature and the city*. New York: Routledge.
- López, M., Solís, G., Murrieta J. y López, R. (2010). Percepción de los ganaderos respecto a la sequía: viabilidad de un manejo de los agostaderos que prevenga efectos negativos. *Estudios Sociales* 17:223-241.
- NDMC (National Drought Mitigation Center) (2023). How does drought affect our lives?. <https://drought.unl.edu/Education/DroughtforKids/DroughtEffects.aspx>
- Ortega-Gaucin, D. (2012). *Sequía en Nuevo León: Vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación*. Apodaca, N.L.: IANL.
- Pineda-Pablos, N. y Salazar-Adams, A. (2016). Ciudades y sequía en México. La gestión del agua como estrategia crítica de mitigación. *Tecnología y Ciencias del Agua* 7(5): 95-113. <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1273>
- Velasco, I., Ochoa, L. y Gutiérrez, C. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Región y Sociedad*, 17(34): 35-71. <https://doi.org/10.22198/rys.2005.34.a615>

¿CÓMO ENFRENTAR UNA SEQUÍA?

RAMÓN AGUIRRE DÍAZ

Sequía: la emergencia silenciosa

Muchas personas abren una llave de agua por lo menos una docena de veces al día, sin reflexionar sobre el esfuerzo que hay detrás y lo que cambiaría la vida cotidiana si no se contara con el preciado elemento vital.

Existe un grave problema de sequía. De acuerdo con el Monitor de Sequía de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), para el 31 de marzo de 2023, el 24% del territorio nacional sufría una sequía moderada y un 23% experimentaba una sequía severa.

¿Dónde impacta más esta situación? Inicialmente a la agricultura de temporal, que se ve

afectada por la falta de lluvias, pero en 2023 la agricultura de bajo riego ya se encuentra en problemas por el efecto acumulado de una sequía severa que alcanzó el 54% del territorio en 2021 y el 32% en el 2022. *Ver figura 1.*

Por la ubicación de México, su territorio es altamente proclive a experimentar sequías agudas. Como se observa en la Figura 2, la parte central y norte del país se encuentra en la misma latitud que los grandes desiertos del mundo: el africano, árabe e hindú, lo que está relacionado directamente a la circulación de los vientos y la humedad en el planeta.



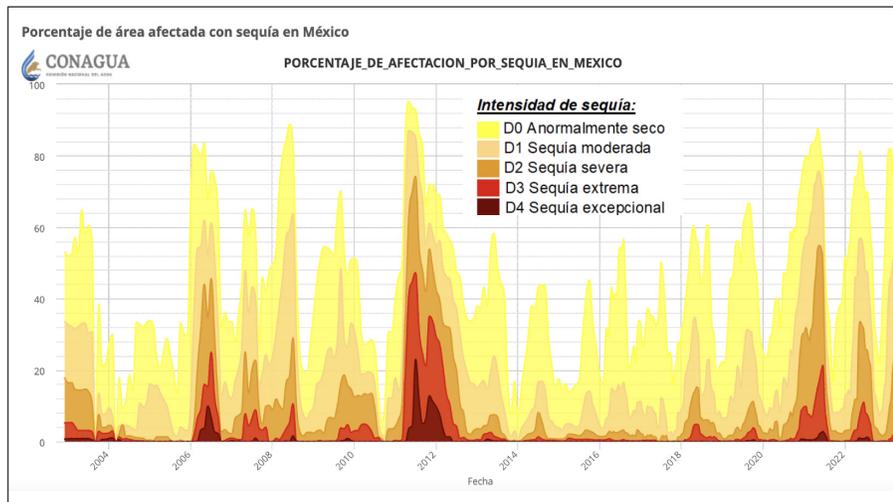


Figura 1. Monitor de Sequía en México. Situación con corte al 31 de marzo de 2023.

Fuente: Monitor de Sequía en México. CONAGUA

Es importante resaltar que, de no ser por los huracanes y ciclones tropicales, gran parte del país sería un desierto. Sin embargo, dichos fenómenos meteorológicos tienen trayectorias aleatorias y un comportamiento errático, por lo que no se garantiza su entrada al territorio y, por tanto, no es difícil que se presenten años secos.

La sequía, lenta y silenciosamente, ha avanzado en los últimos tres años. Durante este periodo los Distritos de Riego se han visto obligados

a reducir proporcionalmente sus áreas de cultivo. Claramente no es lo deseable, pero no queda otra alternativa. Sin embargo, uno de los principales problemas de las sequías se presenta en las ciudades, donde no es factible simplemente dejar a colonias enteras sin el suministro y, entonces, se requiere de medidas que permitan que toda la población cuente con agua, aunque sea en cantidades mínimas para la satisfacción de las necesidades básicas de higiene, limpieza y preparación de alimentos.

Prevención: un gran ausente Infraestructura.

¿Cómo prepararse para una sequía? Conocedores de que las sequías estarán presentes con mayor o menor intensidad, se

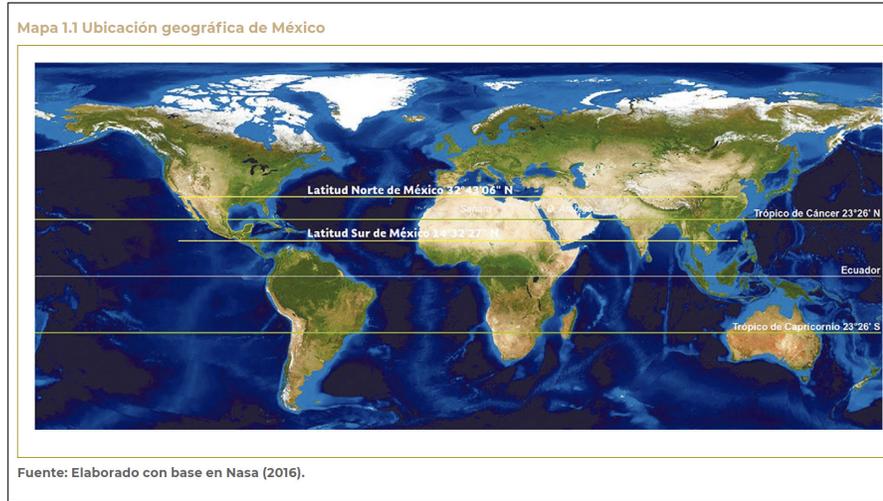


Figura 2. Ubicación geográfica de México.

Fuente: Estadísticas del Agua en México. CONAGUA

necesita preparar y construir la infraestructura que permita enfrentarlas de mejor manera. Para el caso de las ciudades, ninguna de ellas cuenta con un abastecimiento redundante, es decir, fuentes de abasto de sobra. Al contrario, se puede afirmar que México tiene un déficit que se acrecienta ante una sequía.

El problema es mucho mayor cuando se depende de fuentes superficiales. Consecuentemente, no se debe apostar a que las presas

y lagunas darán un volumen constante de agua a lo largo del tiempo. Grandes ciudades, como las Zonas Metropolitanas del Valle de México, Monterrey y Guadalajara, que dependen de fuentes superficiales, están en riesgo y en estos años se ha podido confirmar.

El subsector de agua potable está en déficit y en el de agricultura se cuenta con prácticamente la misma infraestructura que se tenía a mediados de los ochenta, cuando México tenía 80 millones de habitantes, mientras que ahora hay más de 130 millones de personas que demandan alimento.

Estar incluso por debajo del mínimo de infraestructura necesaria no permite enfrentar una sequía con éxito. Desafortu-

nadamente, todo indica que la falta de inversiones en infraestructura hidráulica de las últimas décadas seguirá presente, con lo que el problema será creciente.

Manejo del agua en las presas.

Cuando la ciudad depende de fuentes de abastecimiento superficiales se debe extremar precauciones. Ante la crisis de 2022 por la falta de agua en las presas, uno de los mayores reclamos que hicieron las nuevas autoridades en Nuevo León fue la extracción que se realizó años antes, cuando los niveles estaban bajando. Es una mala apuesta pensar que va a llover lo suficiente en la siguiente temporada como para que se recuperen las presas. ¿Y si no?, pues ahora el problema es mayor, ya que la racionalización del agua deberá ser más fuerte. Lo razonable es disminuir la extracción en cuanto se empiezan a presentar niveles por debajo del promedio.

Es indispensable contar con políticas de operación claras y que no se vean sometidas a los intereses políticos. Los problemas crecen cuando se

permite que las decisiones políticamente convenientes sustituyan a las técnicas.

Organismos operadores eficientes.

Si se cuenta con un organismo operador fuerte, con capacidad técnica y con ingresos que le permitan ser autosuficiente y proporcionar un servicio de calidad, seguramente se puede enfrentar mejor el problema. Desafortunadamente, el promedio nacional es de organismos que no alcanzan a cubrir sus costos operativos, que dan un servicio deficiente y que están politizados, con personal que dura muy poco en los puestos directivos y que, por lo mismo, no alcanza a capacitarse y dar resultados. Menudo problema se enfrenta cuando el principal actor en la solución no tiene las capacidades necesarias. Esta realidad nacional es uno de los principales aspectos a resolver como prevención ante las sequías.

Una ecuación básica

La ecuación para resolver el abastecimiento de agua a una población es realmente sencilla. Simple-

mente se debe igualar la oferta y la demanda. Ver figura 3.

Una figura obvia, pero que invita a la reflexión: si la oferta no está bajo control, se debe voltear a ver la demanda. No se trata de subir una oferta para igualar a una demanda incontrolada, más aún en situaciones críticas. Controlar el consumo y la demanda puede ser, incluso, más efectivo.



Figura 3. Ecuación básica para resolver el abasto a una población. Fuente: elaboración propia

Incremento de la oferta Disminución de las fugas.

Incrementar los esfuerzos en la localización y reparación de fugas visibles y no visibles es indispensable. No se puede estar en una crisis por falta de agua y que ésta escurra por las calles. Es el momento de tomar decisiones sobre el agua que se está perdiendo por tomas clandestinas en los acueductos por parte de rancherías o, incluso, de los usuarios que, al no pagarla, menos la cuidan. La reducción de presiones es de gran ayuda, ya que las fugas son proporcionales a la presión en las tuberías, para ello es importante contar con válvulas de control como parte de la previsión. El tandeo es parte de la solución, ya que permite enviar el agua a zonas determinadas y, por supuesto, un tubo sin agua no tiene fugas -medida que es necesaria, pero debe ser de carácter temporal, ya que el deterioro de los tubos es acelerado-.

Fuentes de abastecimiento provisionales.

La Comisión Nacional del Agua tiene facultades para permitir la perforación de pozos en una

emergencia y así abastecer a la población. Ésta no debe ser una acción permanente porque se trata de extracciones que incrementan la sobreexplotación de los acuíferos, pero que permiten enfrentar la difícil situación. Por supuesto que la acción debe ser rápida, además de contar con recursos para ello, ya que, si se pasa el tiempo en la planeación, sus resultados no son efectivos.

Otra posibilidad importante es alcanzar acuerdos con las empresas que cuenten con permisos de extracción por parte de la CONAGUA, quienes podrían compartir parte de su agua con la población y que, aunque no representa una solución total, sí pueden mitigar la problemática de colonias cercanas a las fábricas. Mediante la publicación en el Diario Oficial de la Federación de un “Acuerdo de inicio de emergencia por ocurrencia de sequía severa, extrema o excepcional...”, la CONAGUA ha dado facultades a los privados para otorgar dicho apoyo.

Una opción distinta es la posibilidad de obtener agua de los agricultores, donde la premisa es el otorgar una compensación económica a cambio del agua que se entregue y que no les permita sembrar. Ésta

es una medida eficaz en situaciones donde se tienen importantes sistemas de riego cercanos a las ciudades.

Disminución de la demanda.

Disminuir el consumo y, con ello, la demanda.

En teoría, es mucho más efectivo bajar la demanda que incrementar la oferta (ver figura 4).

USO DEL AGUA SERVICIO DOMÉSTICO (litros por habitante al día)			
USO	USO NEGLIGENTE	USO NORMAL SIN REDUCTORES	USO CUIDADOSO CON REDUCTORES Y BUENOS HÁBITOS
Inodoros	36	20	15
Lavado de dientes	16.5	6	0.5
Lavados de manos y cara	29.3	14	6
Rasurarse	38.5	12	0.5
Ducha	264	54	18
Lavado de utensilios de cocina	82.5	15	10
Limpieza general de casa	35.85	11	6
Lavado de ropa	40	25	18
Lavado de patio y áreas verdes	30.85	9	6
TOTALES	573.5	166	80

Figura 4. Uso del agua en servicio doméstico.

Fuente: elaboración propia.

Puede concluirse que las variaciones en el consumo son simplemente resultado de la atención y cuidado que las personas otorgan al cuidado del agua. El consumo considerado razonable y normal en el uso doméstico es del rango de los 160 litros por habitante al día, pero un uso negligente puede fácilmente superar los 550 l/hab/día y un uso cuidadoso con accesorios reductores permite incluso bajar a la mitad.

Estrategia de comunicación.

Los mensajes de Cultura del Agua son indispensables, pero a veces resulta contraproducente el que las autoridades busquen no alarmar a la población y minimizar el problema. Es una mejor estrategia de comunicación el presentar un panorama algo pesimista, involucrar a la población en la solución y pedirles que extremen medidas, de esta forma, lo que se logre resolver siempre será bienvenido.

Tarifas y efficientar la cobranza.

Desafortunadamente, no es posible enviar equitativamente el agua a la población por medio de la

red de distribución, hay partes altas y alejadas que sufrirán y, al contrario, las partes bajas tendrán más agua. La cobranza efectiva con el apoyo de micromedidores domiciliarios y una tarifa que desincentive el consumo es gran parte de la solución, manteniendo las mismas tarifas en consumos razonables.

Conclusiones.

México experimenta una sequía acumulada de tres años, pero es necesario prepararse para situaciones aún peores que, con seguridad, se van a presentar. No se puede hacer mucho con el problema encima, por lo que lo razonable sería, desde ahora, tomar medidas para enfrentar lo que vendrá.

Por lo pronto, acciones como las antes descritas se pueden tomar para paliar la situación, pero se depende de que llueva para que se resuelva satisfactoriamente. A futuro el reto es grande y se debe insistir que el agua, como un tema de seguridad nacional, debería dársele la atención que merece y que cada persona ponga de su parte. 💧

EL PROGRAMA NACIONAL CONTRA LA SEQUÍA, PRONACOSE

FELIPE I. ARREGUÍN CORTÉS



Introducción

La sequía es un evento natural que ocurre de manera recurrente en México. Su ubicación geográfica lo ubica en un cinturón del planeta donde se sitúan varios desiertos, ver figura 1.

La mayor parte del territorio nacional tiene características de aridez, que, combinadas con otros fenómenos como el cambio climático, el crecimiento poblacional, patrones de con-



Figura 1. México vulnerable por su ubicación geográfica

sumo inadecuados y políticas de administración del agua no siempre acordes con la realidad de una situación hidráulica frágil en muchas regiones del país, provocan crisis de sequía periódicas que, desafortunadamente, se olvidan una vez que se presentan las lluvias que remedian temporalmente la situación.

La historia

Existen registros de los impactos de las sequías en los pueblos prehispánicos verdaderamente desastrosos (Florescano et al., 1980). Este fenómeno se liga con las migraciones de los pueblos maya y teotihuacano; con registros en casi todo el territorio nacional en la época de la Colonia, y con citas que la relacionan con situaciones críticas de escasez de agua y alimentos de la población que participó en los movimientos de independencia y revolucionario.

Durante el siglo pasado y el actual también han ocurrido periodos de sequía con diferentes niveles de intensidad e impacto en la sociedad mexicana. En la Figura 2 se muestra un registro histórico del presente siglo con diferentes porcentajes de afec-

tación territorial por intensidad de sequía, desde anormalmente seco (en amarillo), sequía moderada, severa, extrema y excepcional (en color marrón), la más intensa.

En esa misma figura puede notarse que en el año 2012, el 92 % del territorio nacional tenía algún grado de sequía -el fenómeno había iniciado en 2010-. Los estados más afectados fueron Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Jalisco, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora y Zacatecas. La sequía de 2010 a 2012 motivó la búsqueda de una mejor gestión de este fenómeno en México.

Para enfrentar esa sequía, el 25 de enero de 2012 se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el Acuerdo por el que se instruyeron acciones para mitigar los efectos de las sequías en las entidades federativas más afectadas. En éste se establece la coordinación de varias Secretarías de Estado para que desarrollasen conjuntamente acciones de mitigación ante la sequía presentada en 2011. El presupuesto federal asignado para las acciones fue de alrededor de 37 mil millones de pesos.

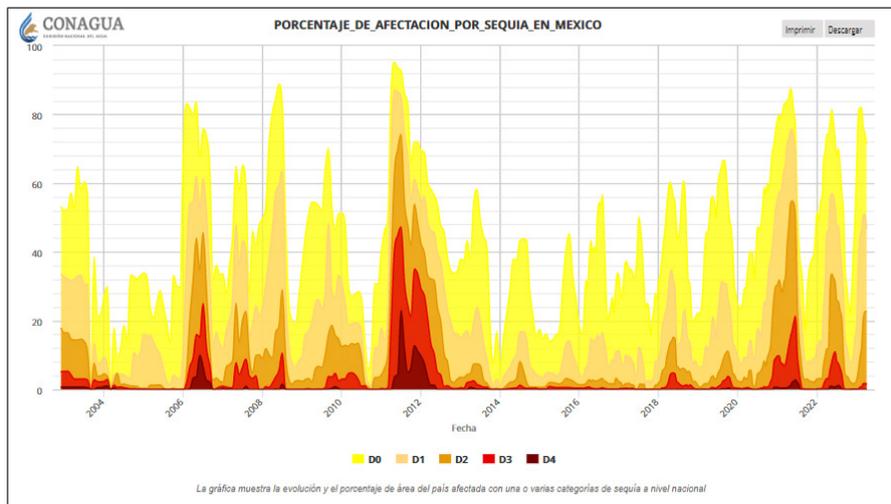


Figura 2 Porcentaje de afectación por sequía en México. CONAGUA 2023.

Se trabajó sobre tres vertientes: a) Componente humanitaria: abasto de agua a la población -especialmente en 10 estados donde las fuentes de agua se agotaron- y protección del ingreso familiar. b) Componente productivo: apoyar al empleo en las zonas afectadas, mantener las capacidades productivas, activar esquemas de aseguramiento y esquemas de financiamiento. c) Componente de infraestructura: manejo adecuado de agua y uso sustentable de recursos naturales con nuevas fuentes de abastecimiento -pozos y galerías- y construcciones que dis-

minuyeran las pérdidas del agua en distritos y unidades de riego -revestimiento de canales-.

El Programa Nacional Contra la Sequía. PRONACOSE

El fenómeno de la sequía afecta a muchos países del mundo, principalmente de África, y en julio de 2011 se desarrolló un simposio internacional para abordar las políticas nacionales sobre sequía, auspiciado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) y la Secretaría de la Convención de las Naciones Unidas de la Lucha contra la Desertificación (UNCCD), en colaboración con otras organizaciones internacionales y regionales.

Entre las conclusiones se estableció que las políticas nacionales deberían considerar

las regiones, los distintos grupos de la población y sectores económicos, y favorecer el desarrollo sustentable. Se señaló que el principio fundamental de las políticas se debe basar en la gestión del riesgo a través de medidas de prevención y mitigación. Es decir, reducir el riesgo de una sequía mediante el desarrollo de una mayor conciencia y comprensión de su peligro y de las causas que producen la vulnerabilidad social (WMO/UNCCD, 2011).

De igual forma, se puntualizó que los principios del manejo de riesgo se deben establecer mediante: el fomento y la aplicación de medidas de prevención a corto plazo; el desarrollo de un sistema de alerta temprana que integre vigilancia y difusión eficiente de la información; la elaboración de planes de preparación en los distintos niveles de gobierno; la adopción de medidas y programas de mitigación; la creación de programas de respuesta a la emergencia, que garanticen las soluciones puntuales y específicas; y, por último, una estructura organizacional que mejore la coordinación intergubernamental y de las partes interesadas.

En 2011 se enfrentaba una sequía en gran parte de México, por tanto, se empezó a desarrollar una política pública de atención, estableciendo que el PRONACOSE debería ser el eje fundamental de dicha estrategia.

El principio del PRONACOSE era cambiar la actitud reactiva que existía por una preventiva. Las líneas de acción en materia de prevención son: el monitoreo y alerta temprana, los programas de medidas para prevenir y mitigar la sequía (PMPMS), la adaptación del marco legal y coordinación institucional, la capacitación, la comunicación y divulgación, y la investigación.

En materia de mitigación se incluye: la Comisión Intersecretarial, actos de autoridad, los programas de fondos federales, y los mecanismos de emergencia (CONAGUA, 2014).

Durante los tres primeros años se tuvo un avance importante en la divulgación de la nueva política a través de su documento rector y de los sistemas de monitoreo y alerta temprana. Además, se llevaron a cabo las siguientes acciones: programa de capacitación para todos los actores involucra-

dos en el PRONACOSE; operación de la Comisión Intersecretarial para Atender las Sequías e Inundaciones, a fin de implementar y dar seguimiento a la nueva política en el ámbito federal; inicio del Comité de Expertos; trabajos para alinear los programas federales relacionados con la sequía; elaboración de 26 Programas de Medidas de Prevención y Mitigación a la Sequía, correspondientes a cada Consejo de Cuenca y principales usuarios del agua; impulso a líneas de investigación sobre sequía -causas, efectos, documentación e instrumentos para mejorar su gestión-; desarrollo de una campaña de comunicación y difusión del PRONACOSE; y atención de los efectos de la sequía en proceso.

En esos años era claro que había varios elementos de la política que no se habían implementado o que estaban en una etapa incipiente. EL PRONACOSE no permeó lo suficiente en las dependencias e instituciones del gobierno federal, mientras que en los Consejos de Cuenca era claro que se requería más tiempo para su asimilación y consolidación.

La sequía en años recientes

Como se puede observar en la figura 2, a partir de 2021 nuevamente empieza a crecer el porcentaje de territorio nacional afectado por la sequía. Éste no es un fenómeno que afecte solo a México, es un problema planetario.

Al menos dos de los nueve límites planetarios (Steffen et al., 2015), basados en el cambio climático, el adelgazamiento de la capa de ozono, la acidificación de los océanos y la acelerada pérdida de los ecosistemas y su biodiversidad, se encuentran en niveles de alto riesgo para el planeta. Ante ello, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) ha planteado que (IPCC, 2022):

“La influencia humana probablemente ha aumentado la posibilidad de eventos extremos compuestos desde la década de 1950. Esto incluye aumentos en la frecuencia de olas de calor y sequías simultáneas a escala mundial (confianza alta); clima de incendios en algunas regiones de todos los continentes habitados (confianza media);

e inundaciones compuestas en algunos lugares (confianza media).”

“..... pero la ubicación y la frecuencia de estos eventos dependen sobre los cambios proyectados en la circulación atmosférica regional, incluidos los monzones y las vías de tormentas de latitudes medias.”

Si a estos fenómenos globales se agregan otros de carácter local como la deforestación, la urbanización, el cambio de la cobertura y uso del suelo, el crecimiento poblacional, y la deficiente administración de los recursos hídricos, se observa que existen las condiciones para que se presenten fuertes eventos de sequía en el país a partir de las sequías meteorológicas.

Los recientes fenómenos de sequía en varias regiones del país en los años 2021, 2022 y el presente han vuelto nuevamente la atención hacia acciones de adaptación.

A finales de 2022 la autoridad del agua comenzó a retomar y actualizar diversos instrumentos de la política nacional contra la sequía como: los Lineamientos para emitir acuerdos de carácter general

por la ocurrencia de sequía; las Medidas preventivas y de mitigación para lograr un uso eficiente del agua durante una sequía; la operación oportuna del Monitor de la Sequía a nivel nacional; los Acuerdos de carácter general por inicio y conclusión de emergencia por ocurrencia de sequía severa; la reactivación de la Comisión Intersecretarial para la Atención de Sequías e Inundaciones; el Acuerdo por el que se emiten los Lineamientos de Operación Específicos para atender los daños desencadenados por fenómenos naturales perturbadores; los Mapas de Vulnerabilidad a la sequía a nivel municipal; el Mapa Probabilidad Amenaza Sequía; el Mapa Semáforo Preventivo por Sequía; y la Actualización de la Política Pública Nacional para la Sequía (CONAGUA, 2023).

Conclusiones

El planeta y México se encuentran en una etapa de no retorno en materia ambiental. Es claro que aun cuando los gobiernos y la sociedad empezaran a actuar de acuerdo con sus compromisos en materia de adaptación y mitigación al cambio climático,

se enfrentarán a etapas más frecuentes de fenómenos extremos. México vive una situación difícil de sequía y parece que se están preparando mecanismos de adaptación a dicho fenómeno.

El PRONACOSE es un instrumento de la política de atención a la sequía. Como se señaló, cuando se abandonó el programa, había varios elementos que no se habían implementado o que estaban en una etapa incipiente. El PRONACOSE no permeó lo suficiente en las dependencias e instituciones del gobierno federal y en los Consejos de Cuenca -la sociedad- y era claro que se requería más tiempo para su asimilación y consolidación.

Es tiempo que ahora autoridad y sociedad retomen este instrumento para enfrentar de manera organizada y permanente un fenómeno de gran impacto para la República Mexicana. Esto podría lograrse mediante la actualización del Documento Rector del PRONACOSE y de los Programas de Medidas de Prevención y Mitigación a la Sequía en aquellas cuencas que están siendo afectadas por las sequías y, sobre todo, fortaleciendo a la Comisión

Intersecretarial con información sobre los riesgos del impacto de este fenómeno sobre el país y con compromisos de cada uno de sus miembros.🔥

Referencias

Comisión Nacional del Agua. (2023). Monitor de sequía. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>. 2023.

Comisión Nacional del Agua, (2014). Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE). <http://www.pronacose.gob.mx/>

Florescano E., Sancho J. y Pérez D. (1980) Las sequías en México: historia, características y efectos. Comercio Exterior, 30 (7), 747-757.

IPCC. (2022) Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S., Fetzer, I., Bennett, E., Biggs, R., Carpenter, S., de Vries, W., Wit, C., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G., Persson, L., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science, 347 (6223), 1259855.

WMO /UNCCD [Organización Meteorológica Mundial / Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación. (2011). International Symposium on Drought and National Drought Policies. <http://sdg.iisd.org/events/international-symposium-on-drought-and-national-drought-policies/>

SISTEMAS DE MONITOREO DE SEQUÍAS

RENÉ LOBATO SÁNCHEZ Y
JOSÉ GUADALUPE ROSARIO DE LA CRUZ
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

RESUMEN

El concepto de sequía es amplio y complejo, depende principalmente de sus impactos en los diversos sectores socioeconómicos y medioambientales, así como las acciones de mitigación. Si bien la escasez de las lluvias inicia el proceso, es hasta sus impactos en la humedad del suelo, vegetación, escurrimientos superficiales, recarga de acuíferos, incluyendo el efecto climático en la temperatura y su respuesta dinámica en la interacción suelo-planta-atmósfera, que produce daños, principalmente en la agricultura, ganadería, desabasto urbano, industria. Estos problemas pueden

agravarse hasta generar crisis alimentaria, desabasto hídrico y un efecto muy importante como es la migración humana. Por sus impactos, la sequía se clasifica en: meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica. Considerando sus impactos, los sistemas de alerta contra sequías requieren de un monitor que les indique el grado de avance en el corto, mediano y largo plazo, considerando su persistencia, con la cual es posible observar la evolución de la sequía y así tomar decisiones basadas en protocolos de atención para reducir el riesgo ocasionado por las sequías extremas.



INTRODUCCIÓN

La sequía es parte de la variabilidad climática natural que ocurre en prácticamente todas las regiones del mundo y aparece cuando las precipitaciones se reducen por debajo de sus valores medios y sus efectos se extienden a la agricultura, la disponibilidad hídrica y la sociedad. “La sequía es un fenómeno complejo debido a su lento desenvolvimiento y sus impactos directos. Es común que las acciones de mitigación de sus impactos se implementen cuando se tiene el fenómeno en su máxima intensidad” (Lobato, 2016), esto debido principalmente a la falta de aplicación de protocolos de mitigación. Una de las definiciones más recurridas es la de Fick et al. (1990), que establece que “una sequía se define como un periodo sostenido de baja precipitación tal que el agua disponible de embalses, escurrimientos, acuíferos y fuentes externas no cumplen con las necesidades de los usuarios de la cuenca”.

Considerando a las sequías como un fenómeno recurrente, éstas se han percibido desde la aparición de las civilizaciones, favoreciendo su desaparición o migración ante la incapacidad de poder

enfrentarlas. A través de un análisis dendroclimológico, Stahle et al. (2018) describen la forma en que los eventos históricos de sequía en Mesoamérica coinciden con algunos conflictos sociales como “el año del hambre”, el período de la Independencia de México, la Revolución Mexicana, entre otros.

En la actualidad se cuenta con el conocimiento sobre los procesos climáticos que pueden exacerbar la condición de sequía (ENSO, PDO, QBO, entre otros), además de los esfuerzos científicos por predecir la evolución del clima cercano -del orden de meses-, favoreciendo la resiliencia social ante este fenómeno. Sin embargo, en la sequía intervienen diversos procesos de escalas espaciales y temporales diferentes, lo que hace complejo determinar su evolución en función de su magnitud, encaminándose hacia las perspectivas -outlooks-, sin que esto llegue a ser un pronóstico.

La utilidad de un monitor de sequías (MS) es observar la evolución del fenómeno a través de diferentes ventanas de tiempo -1, 3, 6, 9, 12 meses y más-, definidas como persistencia, información que se emplea para la correcta toma de decisiones,

principalmente basadas en protocolos de atención previamente definidos para cada sector socioeconómico. Existen sequías de corta duración denominadas como “flash droughts” o sequías súbitas (Gwen Chen et al. 2019) y sequías de larga duración, que pueden durar hasta décadas. Chile es un ejemplo de esta última (<https://www.cr2.cl/megasequia/>).

En el mundo existen diversas metodologías para la elaboración de un MS, pero la mayoría de ellas parte de una iniciativa propuesta por un grupo de trabajo en los Estados Unidos (Svoboda et al., 2002) coordinado por el Centro Nacional de Mitigación de las Sequías (NDMC, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos. En 2002 se establece la colaboración con México y Canadá para conformar el Monitor de Sequías de América del Norte (Lawrimore et al., 2002).

Desde 2002 se produce de manera oficial el Monitor de Sequías de México (Lobato, 2016), que se utiliza para la aplicación de protocolos de mitigación de las a través del Programa Nacional Contra Sequías (PRONACOSE), y cuya elaboración se encuentra en constante mejoría al incluir variables,

indicadores e índices para una descripción del proceso más efectiva.

DESARROLLO

Un MS combina diferentes variables como: precipitación, temperatura superficial, humedad de suelo, condición de vegetación e interacción planta-atmósfera -evapotranspiración-. Además, se pueden incorporar otras variables como el escurrimiento superficial y caudales en ríos, incluso niveles en acuíferos y otras variables más complejas de obtener. La manera de integrar esta información puede ser manual, mediante un SIG´s, y dejando al climatólogo la forma de consolidar en un solo mapa su interpretación, o bien sistematizada, obteniendo la información y ejecución del algoritmo de forma periódica, permitiendo que los equipos de cómputo realicen esta tarea.

Un MS requiere de información histórica diaria confiable con un mínimo de 30 años de las variables antes descritas para, posteriormente, convertir en unidades adimensionales y, de esta manera, agruparlas en un esquema de ponderación.

Por lo general, de forma operativa, el MS se produce en forma mensual, aunque existen países, como en Estados Unidos, donde se elabora de forma semanal. Este alcance depende de la infraestructura de información y de la disponibilidad del personal dedicado. México elabora su MS quincenalmente (<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>).

Un MS está construido con base en índices e indicadores. Para precipitación se recurre al Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés), que convierte los datos de precipitación a una distribución Normal para calcular el número de desviaciones estándar que se encuentren por arriba o debajo de su valor medio (McKee et al., 1993). La Organización Meteorológica Mundial (2012) recomienda el SPI como una herramienta para evaluar la sequía meteorológica, recordando que ésta solo es una etapa de un largo proceso cuyo impacto afecta a muchos otros sectores.

Para el cálculo de los índices de temperatura, humedad del suelo, vegetación y evapotranspira-

ción es posible seguir una metodología similar al SPI, considerando que sus registros históricos tienen una función de distribución de probabilidad no necesariamente gaussiana. Lobato et al. (2019) proponen una metodología de persistencia siguiendo los criterios descritos para su elaboración de forma sistemática. A partir de los Índices Estandarizados de Precipitación, Temperatura, Humedad del Suelo, Vegetación y Evapotranspiración se elabora el MS en un esquema de persistencia con períodos de 1, 3, 6, 9, 12 y 24 meses. Se ponderan dependiendo de la relevancia de cada uno y se obtiene finalmente un mapa integrado de MS (ver Figura 1).

Para la construcción de los índices se requiere de series históricas largas y continuas, con control de calidad, aunque no siempre es factible. Una manera de solventarlo es utilizando datos derivados de satélites y modelos hidrológicos operativos. El mapa integrado (Ver figura 1) es un ejemplo de construcción del monitor de persistencia de la sequía con datos de las siguientes fuentes (véase Tabla 1):

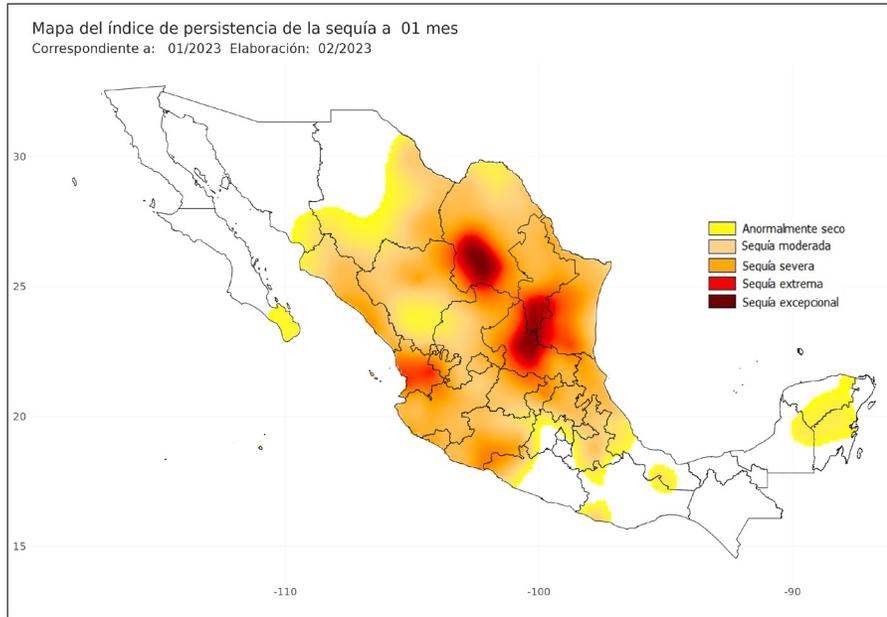


Figura 1.- Monitor de persistencia de sequía a un mes elaborado con índices obtenidos por percepción remota y modelos hidrológicos.

En la incorporación de las variables mencionadas es necesario realizar estudios de predominancia, en el sentido que en unas regiones la humedad de suelo es el factor que más incide en el impacto de la sequía, mientras que en otra región puede ser la precipitación, o alguna otra

variable de las consideradas. Una forma de realizar este análisis es a “prueba y error”, mientras que otra forma más objetiva puede ser a través de Funciones Empíricas Ortogonales.

CONCLUSIONES

Para mejorar la utilidad de un MS útil y objetivo, no solo para los tomadores de decisiones, es necesario involucrar a la sociedad y, en particular, a usuarios específicos, esto les permitirá tomar las acciones correspondientes para minimizar los riesgos asociados. Existe una acción que se denomina “reporte de impactos” que retoma la información recabada por los usuarios y se publica para corroborar los resultados, no es necesario que el usuario sea especialista

Tabla 1.

Variable	Resolución	Fuente
Precipitación	0.25o	CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_monthly/
Temperatura	0.25o	Climate Prediction Center (global monthly land Surface air temperature analysis) ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd51yf/global_monthly/gridded_binary/t.long
Humedad del suelo	0.5o	Climate Prediction Center (global monthly land Surface air temperature analysis) ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd51yf/global_monthly/gridded_binary/w.long
NDVI	0.5o	LP DACC(Land Processes distributed active archive center) Satélite MODIS – Terra https://e4ftl01.crusgs.gov/MOLT/MOD13C2.006/ https://e4ftl01.crusgs.gov/MODV6_Cmp_C/MOLA/MYD13C2.006/

en climatología y sequías en particular, sino que, de acuerdo a su percepción subjetiva, proporcione información que posteriormente se convierte en valores comparables con las escalas del MS.

Debido a la cada vez más escasa disponibilidad de datos de redes de observación, es necesario incorporar a las plataformas satelitales cuyos datos pueden ser corregidos con un número pequeño de estaciones y ofrecer una cobertura espacial y temporal con un costo mínimo. Al respecto existen casos de éxito en los países del occidente de Sudamérica, entre otros.

Es importante incorporar el tema de clima y sequía en la educación básica, en virtud de que el cambio climático antecede eventos de sequía más intensos y, por lo tanto, las comunidades vulnerables estarán en mayor riesgo. 🔥

BIBLIOGRAFÍA

- Frick, D. M., Bode, D., y Salas, J. D. (1990) Effect of Drought on Urban Water Supplies. I: Drought Analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, June, 116 (6), 733-753.
- Lawrimore, J., Heim Jr., R. R. , Svoboda, M., Swail, V. y Englehart, P.J. (2002) Beginning a new era of drought monitoring across North América. https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Beginning_New_Era_Drought_Monitoring_Across_North_America_2002.pdf
- Lobato, R. (2016) El Monitor de Sequías de México, *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7 (5), 197-211.
- Lobato, R., Altamirano, M.A, Hoyos, C., López-Pérez, M., Salas, M.A. y Rosario, J.G. (2019). Procedimiento metodológico para la elaboración de un monitor de la persistencia de la sequía en México, *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10 (1), 146-176.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. y Kliest, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. En *Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology*. Boston: American Meteorological Society, 179-184.
- Svoboda, M., LeComte, D. , Hayes, M. , Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Paleki, M., Stooksbury, D., Miskus, D. y Stephens, S. (2002). The Drought Monitor, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83 (8), 1181-1190.
- Organización Meteorológica Mundial (2012). Índice Normalizado de Precipitación – Guía del usuario, No. 1090. https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf
- Stahle, E., Cook, R., Burnette, J.D, Villanueva, Cerano, J., Burns, J.N., Griffin, D., Cook, B.I., Acuña, R., Torbenson, M.C.A., Sjezner, P. y Howard, I.M. (2016). The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late Pre-hispanic, colonial and modern eras, *Quaternary Science Reviews*, 149, 34-60.
- Gwen Chen, L., Gottschalk, J., Hartman, A., Miskus, D., Tinker, R. y Artusa, A. (2019). Flash drought characteristics based on U.S. Monitor, *Atmosphere*, 10 (9), 498.

USO DE LA TECNOLOGÍA SATELITAL EN LA DETECCIÓN Y MONITOREO DE SEQUÍAS

MOISES MICHEL ROSENGAUS MOSHINSKY
CONSULTOR PRIVADO EN HIDROMETEOROLOGÍA



Resumen

Se presenta el contexto de las observaciones satelitales con respecto a la multiplicidad de índices sobre sequía existentes y las principales formas en que éstas se usan para detección y monitoreo de los diversos parámetros de interés sobre sequías. Se muestran algunos ejemplos sobre productos satelitales. Se plantean capacidades y limitaciones de los productos satelitales y sus perspectivas futuras.

Introducción

La detección temprana de la condición de sequía y el seguimiento de su desarrollo requieren ubicar no

solo su establecimiento puntual en un cierto sitio de interés, sino en la región, su extensión, sus niveles de intensidad, su evolución en el tiempo y su disipación hacia condiciones normales, tareas para las que los productos cuasi-continuos, sobre el tiempo y sobre la geografía del planeta, basados en plataformas satelitales, son idóneos. El hecho de que la anomalía de las condiciones deba ser calculada con respecto a la climatología histórica de los parámetros de interés introduce limitaciones de los índices satelitales con respecto a los índices basados en mediciones directas sobre (o bajo) la superficie del

terreno, ya que típicamente estos últimos cuentan con registros históricos de mayor duración que los satelitales. Pero, estas limitaciones se van subsanando al transcurrir el tiempo y los productos satelitales son cada vez más socorridos, ya sea en forma puramente satelital o combinada con las mediciones puntuales en superficie (Petropoulos e Islam, 2018).

Desarrollo

Los índices sobre sequía originales estaban basados en mediciones de instrumentos en superficie puntuales. Aunque éstos tienen la ventaja de medir directamente los parámetros deseados -precipitación pluvial, humedad, temperatura, radiación solar, evaporación, perfil de humedad en el suelo, combustibilidad, etc.-, tienen simultáneamente la desventaja de ser puntuales y requerir algún mecanismo de interpolación para obtener el campo de la variable sobre la superficie terrestre, así como su evolución en el tiempo. En múltiples casos, la densidad de los instrumentos en superficie disponibles no resulta suficiente para que uno de estos algoritmos de interpolación produzca una aproxima-

ción razonable de los campos buscados. Más aún, grandes extensiones de interés, por ejemplo, regiones boscosas sobre zonas serranas, con frecuencia no cuentan con ninguna instrumentación. En contraste, los sensores remotos sobre plataformas satelitales, aunque usualmente no miden las variables de manera directa, tienen ventajas sobre los instrumentos en superficie para la detección temprana y el monitoreo de la sequía. Intrínsecamente producen mediciones -cuasi- continuas, en tiempo y espacio, con resoluciones adecuadas para el problema de sequía y permiten observar más directamente parámetros de la sequía como extensión y evolución regional en el tiempo. Además, desde el punto de vista de toma de decisiones ágiles y oportunas, el procesamiento central y visualización de grandes áreas de la superficie terrestre desde una estación de trabajo central tiene grandes ventajas.

La detección temprana y monitoreo de la evolución de las sequías requiere calcular las anomalías -o desviaciones- de las variables de interés, usando como referencia los valores típicos de su climatología histórica. Dado que las mediciones por satélite no

son directas, es necesario utilizar su propia climatología histórica, misma que, por razones del relativamente reciente desarrollo de estas tecnologías, no cuenta con una duración muy larga hacia el pasado, siendo que la Organización Meteorológica Mundial recomienda usar un mínimo de 30 años de registro para obtener estadísticas estables. En este sentido, las mediciones vía satélite tienen una desventaja contra los instrumentos en superficie. Dicha desventaja se va resolviendo conforme transcurre el tiempo y las agencias operadoras de satélites ambientales realizan esfuerzos por mantener juegos de datos homogéneos, en sus instrumentos y en sus misiones, aún a través de cambios en los satélites.

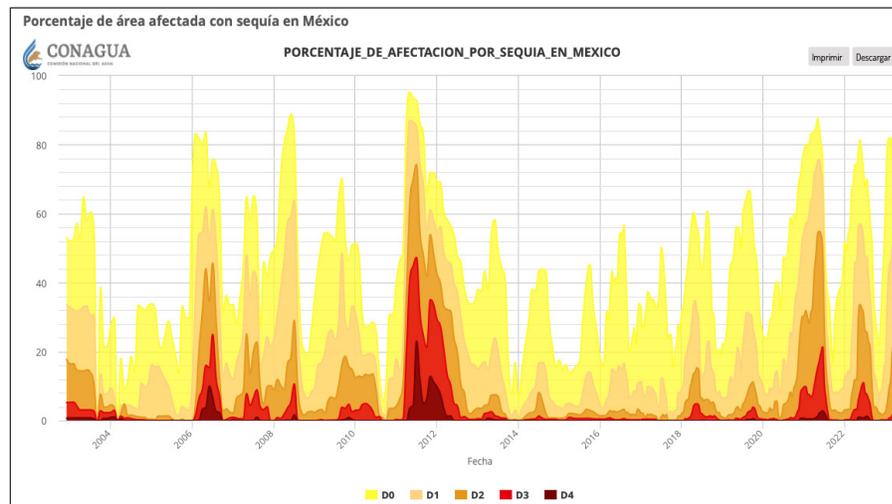


Figura 1. Evolución de la condición de sequía sobre México desde 2003 hasta 2023 con el Monitor de Sequía del SMN/CONAGUA.

Las principales modalidades con las que se hace detección temprana y seguimiento de sequías con productos satelitales son a través de: 1) la estimación cuantitativa de precipitación pluvial; 2) la detección del estado de salud de la cobertura vegetal sobre el suelo; y 3) la cuantificación de la humedad del suelo en una capa relativamente superficial dentro de la cual se encuentran las raíces de las plantas. Se muestran algunos ejemplos, utilizando como apoyo una gráfica de

la evolución a lo largo del tiempo (2003-2023) del porcentaje del área nacional afectada por diferentes intensidades de sequía (D0 a D4), del Monitor de Sequías de México por el Servicio Meteorológico Nacional, véase Figura 1.

La variable más directamente relacionada con la sequía es, evidentemente, la precipitación pluvial, al grado que el índice más común de sequía es el así llamado SPI (Índice de Precipitación Estandarizado), que expresa, para diferentes intervalos acumulados (1, 3, 6, 12, 24 meses), la desviación con respecto al valor histórico medio de la precipitación, pero expresado en unidades de desviaciones estándar locales, típicamente calculado para un punto de interés. Tanto el valor histórico medio como la desviación estándar provienen precisamente del registro histórico del punto en cuestión. Existen múltiples productos satelitales que estiman cuantitativamente la precipitación pluvial acumulada en un cierto intervalo de tiempo, por lo que estos productos pueden tomarse simplemente como si se tratara de un pluviómetro -o pluviógrafo- por cada uno de sus píxeles y, con ello y su

historial en el tiempo, por ejemplo, crear mapas de SPI, pero de fuente satelital. El más simple de estos productos es el Hidroestimador (H-E) de la NOAA, que estima la precipitación acumulada en intervalos de 1, 3, 6 y 24 horas a partir de imágenes en banda infrarroja del los satélites GOES (Scofield y Kuligowski, 2003), con disponibilidad histórica de 2003 a la fecha y resolución de 4x4 km en su inicio y 2x2 km actualmente. Otros productos satelitales de estimación cuantitativa de lluvia son los así denominados CMORPH (también de la NOAA, en su división CPC), provenientes de satélites con sensores de microondas pasivos (resolución de 0.25° x 0.25°, 3h) y disponible desde 2002. Finalmente, e producto denominado IMERG, de la misión TRMM (Misión de Medición de la Precipitación Tropical) y su sucesora, la misión GPM (Misión de Precipitación Global) de la NASA, con resoluciones de (0.1° x 0.1°, 30 min) y disponible desde el año 2000 a la fecha. Las correlaciones que muestran este tipo de estimaciones satelitales contra mediciones en tierra son, en general, superiores a $R=0.7$.

El más común de los índices sobre salud de la cobertura vegetal es el denominado NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) (Galván Ortiz, 2011), aunque no es el único. Proviene de la medición de dos bandas, la visible roja y la de infrarrojo cercano del sensor MODIS montado sobre los satélites Aqua y Terra de la NASA. Es esencialmente un medidor -de -1 a +1- de la densidad de masa vegetal fotosintéticamente activa, indirectamente de si el suelo tiene cobertura vegetal y, cuando la tiene, de su estado de salud. Bajo condiciones de sequía, las plantas sufren estrés hídrico y su valor NDVI se reduce, por lo que se usa como un índice de sequía, con un retardo de respuesta al inicio del déficit de precipitación pluvial de aproximadamente un mes. Los productos NDVI se pueden post-procesar para que sean relativos a sus condiciones normales para cada época del año en cada sitio de la zona de interés, utilizando sus registros de valores históricos. Las resoluciones espaciales del NDVI son las que el satélite fuente (LANDSAT) le permite -15 a 30 m-, aunque sus mediciones se renuevan con relativamente baja frecuencia -16 días-, pero se

encuentran disponibles desde 1972, con un registro histórico de 50 años. Para efectos prácticos, la cobertura es global. En la Figura 2 se muestra el NDVI al 31 de julio de 2005 que, de acuerdo a la Figura 1, coincide con una de las mínimas extensiones de sequía sobre México, mientras que en la Figura 3 se muestra el NDVI al 31 de julio de 2011, en el máximo de extensión de sequía sobre México. Las diferencias del NDVI sobre México entre la Figura 2 (2005) y la Figura 3 (2011) son evidentes.

Otra de las herramientas útiles para detección y monitoreo de sequías es el denominado satélite SMOS (siglas en inglés de Humedad del Suelo y Salinidad del Océano), misión operada por la Agencia Espacial Europea, con un inicio de operaciones relativamente reciente -noviembre de 2009-. Dichas mediciones de humedad del suelo provienen de un radiómetro interferométrico en dos dimensiones con apertura sintética, operando en microondas en banda L, con resolución espacial de 50 km, renovación temporal cada tres días y una precisión de $\pm 4\%$. Como ejemplo, se presenta la comparación en humedad del suelo sobre México entre mayo

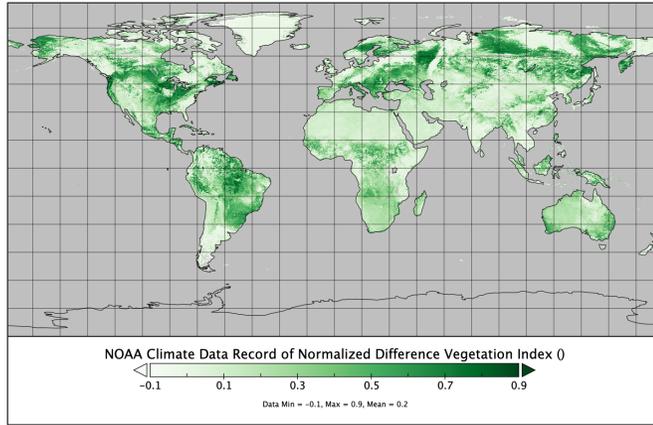


Figura 2. Mapa global de NDVI al 31 de julio de 2005 (año con baja extensión de sequía en México).

de 2015 -hacia el final de la temporada de estiaje- y noviembre de 2015 -hacia el final de la temporada de lluvias-, véase Figura 4 (Lobato Sánchez, 2015). En la Figura 1 se identifica que las condiciones de extensión de sequía sobre México en 2015 eran entre las más reducidas. Por ejemplo, en la zona de la desembocadura del río Mississippi al Golfo de México, o la zona de Tabasco, la humedad del

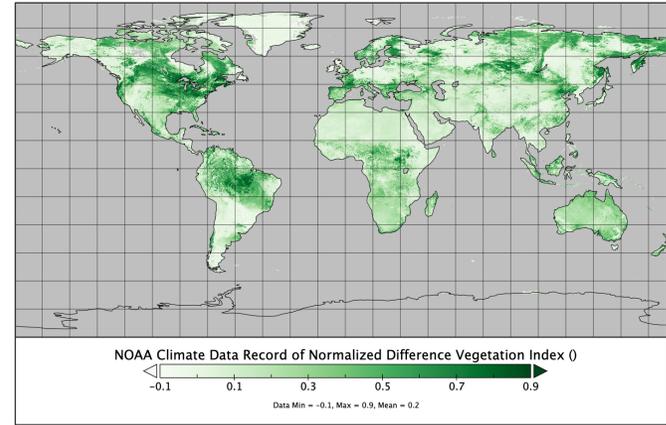


Figura 3. Mapa global de NDVI al 31 de julio de 2011 (año con alta extensión de sequía en México).

suelo, aún en mayo 2015, resulta alta hacia el final del paso de los frentes fríos con sus respectivas lluvias, mientras que el extremo sur de Florida tiene humedades del suelo moderadas. En contraste, después de la temporada de lluvias, que afecta a las tres zonas, para noviembre 2015, las humedades del suelo en los mencionados sitios habían aumentado mucho, acercándose a la saturación. La mejor

forma de utilizar estos productos para detección temprana y monitoreo de sequías no es con los productos absolutos -como los mostrados en la Figura 4-, sino con sus versiones relativas a los valores normales en cada época del año obtenidos de su climatología histórica. Esta variable es un buen ejemplo de un caso en que sería muy difícil realizar lo equivalente con base en mediciones puntuales, sobre todo en las condiciones de escasez de instrumentación de este tipo en México.

Conclusión

Más allá de los ejemplos presentados, como una reducida muestra de las herramientas satelitales disponibles para detección temprana

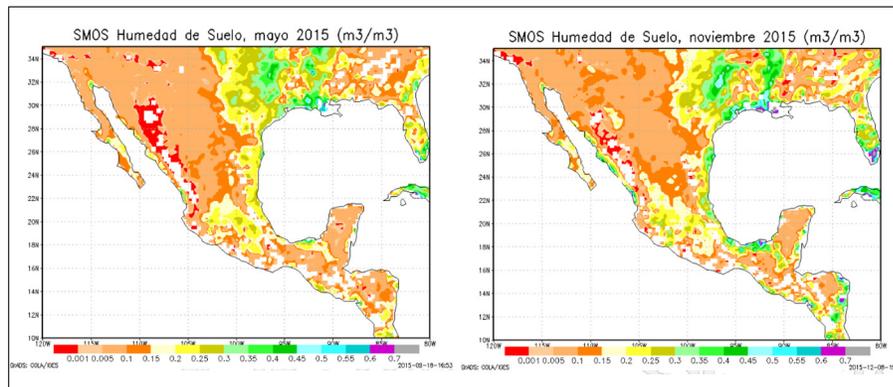


Figura 4. Mapa nacional de humedad del suelo SMOS (comparación entre mayo 2015 y noviembre 2015).

y seguimiento de condiciones de sequía, es necesario enfatizar que el cambio climático global complica el proceso. En teoría, los productos en tiempo real deben ser visualizados en términos relativos a sus valores usuales -estadísticos- para cada época del año y cada región del país, es decir, normalizados con respecto a una muestra histórica de unos 30 años, supuestamente estacionarios. Pero el cambio climático global ha introducido tendencias en todas las variables pertinentes, que hacen a estas muestras históricas un registro no estacionario, es decir, que los valores estadísticos representativos del principio de estos 30 años ya no permanecen constantes hacia el final de estos 30 años,

lo que debe ser considerado, al menos conceptualmente, al interpretar los productos en el contexto de detección temprana y seguimiento de la condición de sequía. 🔥

Bibliografía

Galván Ortiz, L. M. (2011). Impacto de la sequía meteorológica en la vegetación en distintas regiones climatológicas de México (1982-2006). *Tesis de Maestría*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Lobato Sánchez, R. (2015). Estimación de humedad del suelo con base en imágenes de satélite. Informe Final Proyecto TH1508.1. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Petropoulos, G. P. y Islam, T. (2018). *Remote Sensing of Hydrometeorological Hazards*. Florida: CRC Press.

Scofield, R. A. y Kuligowski, R., J. (2003). Status and outlook of operational satellite precipitation algorithms for extreme precipitation events. *Weather and Forecasting* 18 (6):1037-1051.

GESTIÓN DE PRESAS PARA EL ABASTECIMIENTO DEL SECTOR AGROALIMENTARIO ANTE EL FENÓMENO DE SEQUÍA

**KIMBERLY MENDIVIL-GARCÍA,
LEONEL ERNESTO AMÁBILIS-SOSA**
CONACYT-TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO/IT DE CULIACÁN

ADRIANA ROÉ-SOSA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE CULIACÁN

JHONATAN JESÚS HERMOSILLO-NEVÁREZ
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE



Resumen

El fenómeno de la sequía en México ha sido un problema de gran preocupación para el sector agroalimentario del país, principalmente en los estados del norte. Para estos estados, resulta imprescindible la captación de agua de lluvias a través de las presas para después utilizarlas en el riego de los cultivos. Una mala estimación de la disponibilidad del agua podría comprometer el bienestar económico y social de estas zonas. Por ello, es importante considerar metodologías que permitan estimar, de

manera certera, la cantidad real de agua disponible para las diferentes actividades. Esto es, tomar en cuenta el fenómeno del azolvamiento en las presas, ya que afecta a su capacidad útil de almacenamiento. En este trabajo se presenta el caso de estudio de la presa Sanalona donde se incorpora el cálculo del azolvamiento para conocer la capacidad disponible de almacenamiento para abastecer al sector agroalimentario.

Introducción

Las sequías han sido definidas como un fenómeno natural cuya principal característica es una deficiencia de humedad anormal y constante con efectos negativos sobre la vegetación, la fauna y las personas (IMTA, 2019). La sequía que sufre México se debe principalmente al fenómeno climático “La Niña”, que origina un descenso de la temperatura del mar y modifica los vientos y precipitaciones. En particular en los últimos años, este fenómeno se ha presentado de forma extrema, comprometiendo la seguridad alimentaria y, por ende, económica y social del país.

México es el noveno país con mayor producción agroalimentaria y el séptimo exportador a nivel mundial (CMDRS, 2022). Los estados del norte del país son los principales productores de alimentos con cosechas valuadas hasta en 70 mil millones de pesos, destacando los estados de Sinaloa, Sonora y Coahuila (SIAP, 2021). El riego en estos cultivos es mayoritariamente por surco, haciendo a la región altamente dependiente de los cuerpos de agua superficiales. Así, los efectos de la sequía se acen-

túan más en esta zona, debido a que predomina el clima seco y seco-desértico, con aproximadamente el 30 y 20% del territorio nacional, respectivamente.

En este contexto, resulta de vital importancia asegurar la disponibilidad del recurso hídrico de manera que no afecte el ámbito económico y social. Las presas de almacenamiento han sido la principal estrategia a nivel nacional. Sin embargo, en muchas regiones la infraestructura hidráulica se encuentra cerca del término de su vida útil, la cual, además, pudo haber sido reducida por las altas tasas de deforestación de las últimas décadas y por los cambios en los regímenes pluviales.

Las sequías y su efecto en el abastecimiento de las presas en México

En los últimos años, los problemas de escasez de agua se han difundido a toda la sociedad. En particular, en el periodo de 2018-2019 hubo un incremento de entre el 7 y el 35% de municipios con niveles de sequía en categoría de emergencia en 23 estados del país. En el 2022 se experimentó una de las sequías más extremas, puesto que 19 entidades

cidad de los principales embalses de los estados del norte de México estaba reducida respecto al promedio registrado de los últimos cinco años (Véase Cuadro 1), generando preocupación tanto para productores como para la sociedad en general debido a la incertidumbre de abastecimiento para las actividades económicas y domésticas.

Al 10 de marzo del 2023, el registro de almacenamiento en las presas indica que 96 se encuentran por arriba del 50%, 30 entre 20 y 50% y 12 presas con niveles por debajo de 20% de su capacidad, superando a lo registrado un año anterior, por lo que se estima que el problema de abastecimiento para este año no sea tan severo como lo fue en 2021 y 2022. Sin embargo, existe

Región	Presa	(promedio de los últimos 5 años)	% Actual	Diferencia respecto al promedio	Indicador respecto al promedio	Almacenamiento (hm ³)
Nay	Aguamilpa Solidaridad (Aguamilpa)	74.7	59.0	-15.7	↓	3,418.56
	Adolfo López Mateos	28.4	29.0	0.6	↑	903.64
Sin	Gustavo Díaz Ordaz (Bacurato)	34.0	46.0	12.0	↑	747.79
	Ing. Aurelio Benassini Vizcaino	37.2	48.0	10.8	↑	194.20
	Ing. Guillermo Blake Aguilar	29.3	61.0	31.7	↑	180.10
	Ing. Juan Guerrero Alcocer (Vínoramas)	25.8	31.0	5.2	↑	16.95
	José López Portillo (El comedero)	35.7	28.0	-7.7	↓	717.83
	Josefa Ortiz de Domínguez	70.5	90.0	19.5	↑	466.37
	Lic. Eustaquio Buelna	40.9	50.0	9.1	↑	39.89
	Luis Donald Colosio	40.0	38.0	-2.0	↓	1,204.10
	Miguel Hidalgo y Costilla	46.1	48.0	1.9	↑	1,587.75
	Sanalona	40.8	54.0	13.2	↑	371.96
	Son	Abelardo Rodríguez Luján	1.8	4.0	2.2	↑
Adolfo Ruiz Cortines		12.8	38.0	25.2	↑	453.06
Álvaro Obregón		36.8	51.0	14.2	↑	1,545.11
Cornaquito		17.8	18.3	0.5	↑	5.30
Cuauhtémoc		14.5	9.0	-5.5	↓	3.70
Ignacio Ramírez Alatorre		10.1	18.0	7.9	↑	2.87
Lázaro Cárdenas (Angostura)		81.0	95.0	14.0	↑	666.17
Plutarco Elías Calles		56.2	41.0	-15.2	↓	1,153.45

Cuadro 1. Comportamiento de variaciones porcentuales de capacidad de las presas al 10 de junio del 2022. Fuente: (SIAP, 2022)

una zona de azolve que va reduciendo la capacidad útil de las presas y cuando se estima la disponibilidad de agua para los diferentes servicios hace que difiera con la cantidad real disponible, comprometiéndose las necesidades básicas de la sociedad.

Presas y su capacidad real para el abastecimiento ante las sequías

Conocer la capacidad de las presas utilizadas para riego agrícola permite saber la forma en que se administrará el recurso hídrico para aprovecharlo de forma eficiente. El dimensionamiento de las presas está determinado por las elevaciones principales, como el Nivel de Aguas Mínimo de Operación (NAMIMO), Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO), que es el nivel máximo con que puede operar una presa para satisfacer la demanda, y el Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME). El volumen que se almacena entre el NAMO y el NAMINO se le llama volumen útil y es con el que se satisface la demanda de agua (CONAGUA, 2022).

Un problema derivado de la deforestación y cambios de uso del suelo es el azolvamiento. Este

fenómeno se produce porque durante la escorrentía se transporta un gran número de partículas derivadas de la erosión de los suelos y contaminación aguas arriba. Estos sólidos suspendidos llegan a las presas y, al sedimentarse, forman parte del azolve, reduciendo la capacidad útil de las presas. Cuando se hacen las estimaciones de la disponibilidad de agua para los diferentes servicios, los volúmenes de agua difieren con la cantidad real disponible.

Un caso estudiado es el de las presas de Sinaloa. Se cuenta con 12 presas y la superficie susceptible a utilizarse para uso agrícola es del 22.2% del territorio estatal (SIAP, 2022). En particular, la Presa Sanalona es la más antigua del estado, por lo que se considera que el fenómeno de azolvamiento es más acentuado. Además, la sequía extrema presentada en la región y las prácticas agrícolas intensivas resultan en menos cobertura vegetal y, por ende, menor protección del suelo superficial en cuenca alta, lo que sugiere un mayor arrastre de partículas sedimentarias a la presa cuando comienzan las precipitaciones.

En la evaluación realizada en Amábilis-Sosa et al. (2021) se consideraron datos de sólidos suspendidos totales de un periodo de 70 años para hacer la proyección de la evolución de sedimentación en la presa a través del cálculo del flujo másico, además de mediciones de profundidad en 12 puntos distribuidos en todo el cuerpo de agua. En una representación gráfica del muestreo los sitios se simbolizan por medio de flechas en color rojo, las crestas indican la acumulación del sedimento y los valles indican las zonas profundas del cuerpo de agua, estos últimos en la zona más cercana a la cortina (Véase Figura 2).

De acuerdo con el flujo másico calculado para el último periodo de estudio (julio-sep-

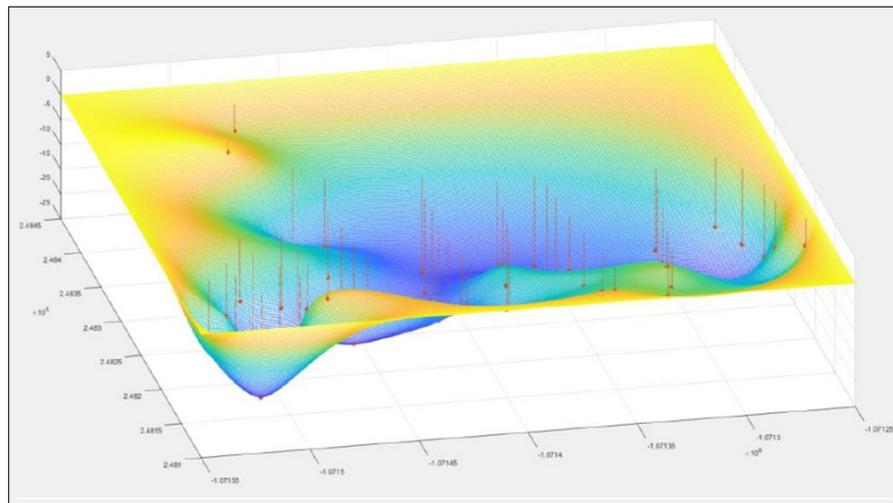


Figura 2. Representación en 3D de las profundidades registradas en la presa Sana-lona a través del método Kriggin de interpolación.

tiembre del 2018), se estimó que existe un acumulado de 336, 116, 266.20 toneladas de sedimento, lo que representa el 30.9% de la capacidad útil de la presa, equivalente a una tasa de azolvamiento calculada de 3.962 Mm³/año. Esto implica limitaciones en la disponibilidad del agua para soportar las actividades económicas y antropogénicas de la región en el 2030, impactando directamente en el Distrito de Riego 010, el tercero más importante del país, al tener un volumen concesionado

de 1, 598, 832 m³ (CONAGUA, 2020) y, por ende, en la producción de alimentos.

Conclusiones

Ante los escenarios de sequía en México, resulta indispensable asegurar la disponibilidad del agua de las presas para satisfacer las necesidades agroalimentarias y domésticas. En las regiones más afectadas por las altas temperaturas y episodios de sequías periódicas se realiza la mayor producción agropecuaria de México. Ante esto, es importante considerar en los monitoreos de las presas, la zona o nivel de azolvamiento. Para este propósito, se deben desarrollar y/o aplicar metodologías para establecer las condiciones reales de almacenamiento de las presas y permitir a los organismos de cuencas distribuir de una manera equitativa el recurso disponible y evitar conflictos sociales. 💧

Bibliografía

Amábilis-Sosa, L. E., López-Ortiz, M.D., Mejía-Rojo, G., Roé-Sosa, A., Mendivil-García, K. (2021). Estudio integral del agua y sedimentos de la presa Sanalona, Sinaloa. En: Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. ed. *Sustentabilidad y desarrollo: I Aspectos Socioecológicos*. Ciudad de México: Ediciones y Gráficos Eón.

BANXICO [Banco de México]. (2022). Informe trimestral Abril-Junio 2022. <https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/informes-trimestrales/%7B593C3638-3DEC-6A98-2132-64A32B9381CF%7D.pdf>

CMDRS [Comisión de Recomendaciones a Programas]. (2022). El campo en México. Retos y perspectivas 2022. <https://www.cmdrs.gob.mx/sites/default/files/cmdrs/sesion/2022/08/23/4661/materiales/el-campo-en-mexico.pdf>

CONAGUA [Comisión Nacional del Agua]. (2020). Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-agricolas-de-los-distritos-de-riego>

CONAGUA [Comisión Nacional del Agua]. (2022). <https://app.conagua.gob.mx/spr/glosario.html>

CONAGUA [Comisión Nacional del Agua]. (2022) *Monitor de sequía en México*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>

IMTA [Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua]. (2019). ¿Que son las sequías? <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-son-las-sequias?idiom=es>

INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía]. (2019) https://www.inegi.org.mx/app/cuadroentidad/Sin/2019/01/1_6_3

SIAP [Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera]. (2021). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

SIAP [Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera]. (2022). *Almacenamiento de agua en presas de uso agrícola*. <https://www.gob.mx/siap/documentos/reporte-de-almacenamiento-de-agua-en-presas-de-uso-agricola>

SIAP [Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera]. (2022). *Susceptibles de ser cultivadas del estado de Sinaloa*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/766434/25_Susceptible_de_ser_cultivada.pdf

BIOCARBÓN PARA REDUCIR LOS EFECTOS NEGATIVOS DE LAS SEQUÍAS EN CULTIVOS DE TRIGO DEL CENTRO DE MÉXICO

LENIN EJECATL MEDINA OROZCO

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO/I.T DEL VALLE DE MORELIA

IVÁN N. MEDINA OROZCO

UNIVERSIDAD VIRTUAL DEL ESTADO DE MICHOACÁN

Resumen

La agricultura es uno de los sectores más sensibles al cambio climático. Las anomalías en la precipitación y la temperatura favorecen sequías que causan disminución en la productividad agrícola y generan problemas económicos y sociales, principalmente en los países en desarrollo. Las prácticas con manejo intensivo del suelo y las quemas agrícolas aceleran la pérdida del agua residual del suelo, reduciendo su capacidad de almacenamiento de agua (CAA). Este tipo de escenario, asociado al cambio climático, genera que el trigo experimente estrés hídrico. En el artículo se presentan los resultados de la capacidad del biocarbón como una

alternativa para incrementar la CAA del suelo. Se realizó un ensayo adicionando biocarbón en suelo cultivado con trigo. Los resultados sugieren que la enmienda incrementó significativamente la CAA, pasando de 420 a 525.5 mL, en contraste con el control, lo anterior significa una retención de 3,150 m³/ha, 20.1 % más que sin enmienda.

Introducción

Las anomalías climáticas en la precipitación y las temperaturas causan detrimento de la producción agrícola, principalmente en países en desarrollo. Las proyecciones sugieren que para el año 2050, el



cambio climático reducirá la producción del trigo en un 5.5% como resultado de la escasez y la baja disponibilidad del agua, asociado a la reducción de la fertilidad del suelo y el incremento de plagas y enfermedades en los cultivos (Malhi et al., 2021). Entre los efectos negativos del estrés hídrico se han reportado: reducción de la producción, principalmente si se presenta en las etapas tempranas o en la etapa de llenado de grano; disminución del área foliar; decremento de la materia seca; y bajo desarrollo radicular, que se manifiesta en menor absorción nutrimental (Arseniuk, 2015; Daryanto et al., 2017). Entre los factores ambientales a los que el trigo presenta mayor sensibilidad se encuentra la reducción de la humedad del suelo por las alteraciones en el ciclo hidrológico, causando estrés hídrico y generando incertidumbre, principalmente en sitios agrícolas de temporal (Daryanto et al., 2017).

Las prácticas agrícolas convencionales que promueven la quema de los residuos agrícolas favorecen la pérdida de agua del suelo durante la combustión de la biomasa, además, volatilizan el carbono y nitrógeno, y disminuyen la biodiversidad edáfica (véase



Figura 1. Quemados de residuos agrícolas en cultivos de trigo.

Figura 1). La fracción de agua que se pierde durante la quema agrícola es repuesta vía riego o lluvia, generando mayor huella hídrica (HH) del cultivo. Se estima que la HH global de la producción de trigo es de 108,000 millones m³/año (Mekonnen y Hoekstra, 2010), misma que se podría agravarse por el manejo inadecuado del suelo y los cambios en los regímenes de la lluvia y temperaturas.

El biocarbón (biochar) es un carbón vegetal derivado de la combustión de biomasa vegetal en condiciones de baja disponibilidad de oxígeno, proveyéndolo de una alta porosidad y cargas de superficie que le dan un comportamiento similar a las arcillas orgánicas del suelo. Se propone como alternativa para el almacenamiento de carbono en suelos y para incrementar la nutrición vegetal y la biodiversidad del suelo. El biocarbón es considerado como una enmienda alternativa para contrarrestar los efectos negativos por estrés hídrico y salinidad en ambientes semiáridos. En condiciones de sequía edáfica, el biocarbón es capaz de aumentar la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (CAAs) y mejorar las capacidades físicas y químicas del mismo. La falta del agua en el suelo y la salinidad son fenómenos asociados que causan daños en el desarrollo de la vegetación cultivada, sin embargo, el biocarbón ha mostrado un efecto positivo al aumentar la CAAs y reducir los efectos negativos del sodio intercambiable, disminuir el pH y aumentar la disponibilidad del fósforo (Ali et al., 2017).

De acuerdo con la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2009), habrá que brindar alimentos a más 9,600 millones de habitantes para el año de 2050, mientras que los cultivos agrícolas están expuestos con mayor frecuencia a factores de estrés abióticos, como la sequía, salinidad y otros. A nivel mundial, la energía y la proteína consumida por los seres humanos provienen principalmente de granos como el maíz, trigo y arroz; sin embargo, las lluvias erráticas y una cantidad inadecuada de lluvia generan sequías y reducen la producción del trigo (Daryanto et al., 2017).

De acuerdo con la información del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2022), en nuestro país, durante el año 2021, se sembró una superficie con trigo de 553,825 ha, de las cuales 73,911 ha son de temporal y su producción promedio fue de 1.92t/ha. Por su parte, el estado de Michoacán reporta 44,082 ha, de las cuales 979 ha son de temporal, pero con rendimientos de 2.55 t/ha, superiores al promedio nacional. Lo anterior muestra la importancia del cultivo de trigo de temporal en el estado de Michoacán.

Desarrollo

Se cultivaron trigos de la variedad Urbina S2007 en una zona cercana al valle Morelia-Queréndaro, que presenta un clima del tipo templado subhúmedo con lluvias en verano, temperaturas promedio de 19°C y precipitación de 796 mm anuales (A) Cb(w1)(w)(e)g (García, 2004). El trigo fue sembrado en macetas de plástico con volumen de 1.9 L y 600 gramos de suelo seco. El suelo fue recolectado en una parcela de producción de trigo. El ensayo consistió de 60 macetas separadas en tres bloques completos, teniendo un control (C) y un tratamiento (T1). El tratamiento consistió en adicionar 1% (6g) de biocarbón finamente triturado. El biocarbón se obtuvo a partir de la pirólisis de biomasa de olotes de maíz. La dosis de fertilización fue de 240N-50P-50K en ambos tratamientos. La capacidad de retención de agua en el suelo (CAAs) se midió con el método del lisímetro, usando una báscula de precisión. Se aplicaron riegos hasta saturación, 470mL por cada maceta, se dejó fluir el agua en exceso, lo cuál ocurrió en 30 minutos, aproximadamente. Una vez concluido el flujo, se pesaron las macetas y, por

diferencia de pesos entre el inicial y final, se obtuvo el agua retenida en el suelo. El análisis estadístico consistió en la prueba de Anova con prueba de Tukey-Kramer y α 0.5. Se utilizó el programa Mini-tab® v14.

Resultados y conclusiones

Los resultados indican que la CAAs en (T1) fue de $525.5 \pm 27.2\text{mL}$, significativamente superior ($p = 0.00001$), en contraste con (T0), en donde el valor promedio fue de $420 \pm 41.9\text{mL}$. La diferencia en CAAs fue superior en un 20.1% utilizando la enmienda de biocarbón. Asumiendo una densidad aparente (Dap) promedio de 1.2g/cm^3 para un Vertisol y un desarrollo radicular de 30cm del trigo; se puede sugerir que la CAAs utilizando biocarbón será de aproximadamente $3,150\text{m}^3/\text{ha}$, en comparación con $2,488\text{m}^3/\text{ha}$ sin enmienda. Adicionalmente, el rendimiento en T1 fue de $7.4\text{t}/\text{ha}$, en contraste a $7.0\text{t}/\text{ha}$ en T0, sin ser diferentes estadísticamente.

El biocarbón puede ser un atenuante en cultivos de temporal ante la inestabilidad de las futu-

ras lluvias en un escenario de cambio climático (Daryanto et al., 2017). La enmienda tiene un efecto similar al que se puede lograr con tecnologías de Agricultura de Conservación (AC), que reportan una humedad de 12 a 42% durante el estiaje y de 20 a 52% en Vertisoles de Michoacán (Báez-Pérez et al., 2017). Sin embargo, los sistemas bajo AC se encuentran en constante riesgo de incendios por parcelas aledañas o de cambios en la labranza, cuando por necesidad se requiere realizar otro tipo de cultivo. Otra práctica que se ha utilizado en zonas áridas y semiáridas para un mejor aprovechamiento del agua al reducir la evaporación son los acolchados plásticos (AP). La literatura indica que el uso de AP incrementa la producción de trigo en 18 % con respecto a sitios sin acolchado; sin embargo, presenta efectos negativos en el ambiente, como degradación de la biodiversidad, decrecimiento de la fertilidad del suelo y acumulación de residuos plásticos en el suelo (He et al., 2018). Actualmente, la contaminación de suelos y agua por microplásticos en ambientes agrícolas es considerado un problema con repercusiones globales en las cadenas trófi-

cas y en la salud humana (Tian et al., 2022); por lo anterior, es importante encontrar soluciones al problema de la sequía en la agricultura, utilizando tecnologías lo más amigables con el ambiente. 🔥

Bibliografía

- Ali, S., Rizwan, M., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., Ibrahim, M., Riaz, M., ...& Shahzad, A. N. (2017). Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 12700-12712.
- Arseniuk, E. (2015). Triticale Abiotic Stresses—An Overview. En Eudes, F. (eds) *Triticale*. Springer, Cham.
- Báez Pérez, A., Limón Ortega, A., González Molina, L., Ramírez Barrientos, C. E., & Bautista-Cruz, A. (2017). Efecto de las prácticas de agricultura de conservación en algunas propiedades químicas de los Vertisoles. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8 (4), 759-772.
- Daryanto, S., Wang, L., y Jacinthe, P. A. (2017). Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review. *Agricultural Water Management*, 179, 18-33.
- FAO [Food and Agriculture Organization]. (2009). Global agriculture towards 2050. En *Proceedings of the High Level Expert Forum—How to Feed the World*, 2050, 1-4.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- He, G., Wang, Z., Li, S. y Malhi, S. S. (2018). Plastic mulch: tradeoffs between productivity and greenhouse gas emissions. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1311-1318.
- Malhi, G. S., Kaur, M. y Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability*, 13 (3), 1318.
- Mekonnen, M. M. y Hoekstra, A. Y. (2010). A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. *Hydrology and earth system sciences*, 14 (7), 1259-1276.
- SIAP [Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera]. (2022). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. (filtros: cultivo, nacional, año 2021 y cultivo, estatal, año 2021). <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Tian, L., Jinjin, C., Ji, R., Ma, Y., & Yu, X. (2022). Microplastics in agricultural soils: sources, effects, and their fate. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 25, 100311.

BREVE CONCEPTUALIZACIÓN DE LA SEQUÍA HIDROLÓGICA EN MÉXICO Y LA IMPORTANCIA DE LA RESILIENCIA COMO HERRAMIENTA PARA MITIGAR SUS IMPACTOS

ANALaura SÁNCHEZ MÉNDEZ
TECNOLÓGICO DE MONTERREY - CAMPUS CUERNAVACA



ARTÍCULO

Resumen: *Las sequías son períodos de escasez de recursos hídricos cuyas consecuencias se expanden paulatinamente a través de los sectores socioeconómicos. Sin embargo, los impactos únicamente se vuelven devastadores cuando se cuenta con sistemas sociales y ecológicos vulnerables. Debido a su geografía y demografía, México es un país propenso a sufrir sequías y altamente susceptible a sus impactos, por lo que se requiere implementar estrategias de mitigación que fortalezcan el nivel de resiliencia de los sistemas sociales y ecológicos del país para salvaguardar el bienestar de todos los mexicanos en el futuro, especialmente aquellos que dependen directamente de las actividades del sector primario.*

En 2022, casi 24 millones de mexicanos dependían directa o indirectamente de la agricultura (INEGI, 2022), sin embargo, esta actividad está en riesgo debido al considerable incremento de sequías durante los últimos años (BANXICO, 2022) (Figura 1).

Cuando se habla de sequía hidrológica se refiere a un fenómeno que puede extenderse por varios años como consecuencia de la disminución de lluvias, afectando los escurrimientos, ríos, presas y acuíferos (Velasco, 2015), es decir, la disponibilidad de recursos hídricos en general (IPCC, 2022). Es un evento complejo, disruptivo y extenso, cuya naturaleza provoca que, generalmente, solo se

piense en confrontar sus impactos por medio de la adaptación, dejando de lado la mitigación. Dentro del presente trabajo se conceptualiza la dinámica de las sequías en México, al tiempo que se exploran los conceptos de vulnerabilidad y resiliencia, con especial atención en su potencial para prevenir los impactos de las sequías en el país.

A pesar de que virtualmente cualquier zona puede presentar sequías, globalmente existen regiones más propensas a experimentarlas y más susceptibles a sus impactos (Dobler-Morales y Bocco, 2021), entre ellos, México. El territorio nacional presenta una precipitación variable, sin embargo, de acuerdo con Dobler-Morales y Bocco (2021), las repercusiones por sequía tienden a ser más graves que en otras regiones debido a dos factores particulares: (1) la relación precipitación-demanda y (2) los niveles de vulnerabilidad de la población.

El primer punto es consecuencia de la geografía y demografía del país, pues facilitan que exista una relación inversa entre la distribución de la precipitación y la demanda de agua. Más de la mitad de la

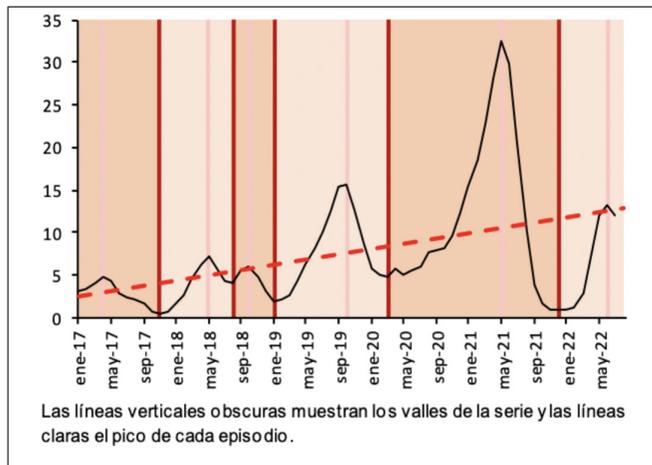


Figura 1. Porcentaje de municipios en estado de emergencia por sequía. Promedio móvil de 3 meses en porcentaje (BANXICO, 2022).

precipitación anual del país es captada por un 10% del territorio localizado en el sur (Dobler-Morales y Bocco, 2021), mientras que el 52% del país tiene clima árido o semiárido (IMCO, 2023) y recibe apenas entre el 5 y el 10% de la precipitación anual (Dobler-Morales y Bocco, 2021) (Figura 2).

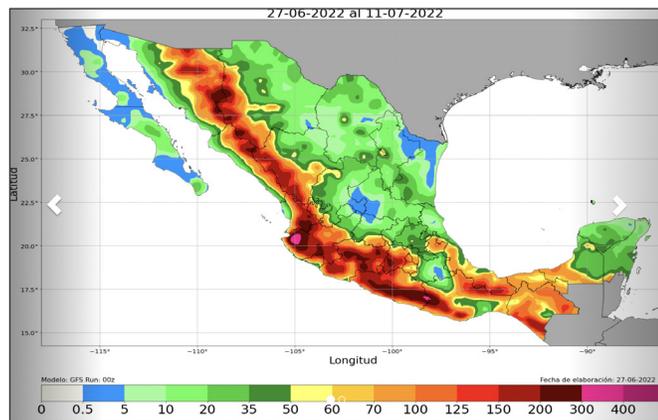


Figura 2: Pronóstico subestacional de precipitación acumulada en 15 días con base en el modelo “Climate Forecast System, Versión 2” (CFSv2) de la NOAA-CPC con ajuste de sesgo por el Servicio Meteorológico Nacional.

Por otra parte, un alto porcentaje de la población mexicana experimenta vulnerabilidad social y, por ende, cuenta con infraestructura insuficiente para afrontar los efectos de las sequías o, incluso, adaptarse después de la catástrofe (Dobler-Morales y Bocco, 2021). De acuerdo con el Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el Cambio Climático

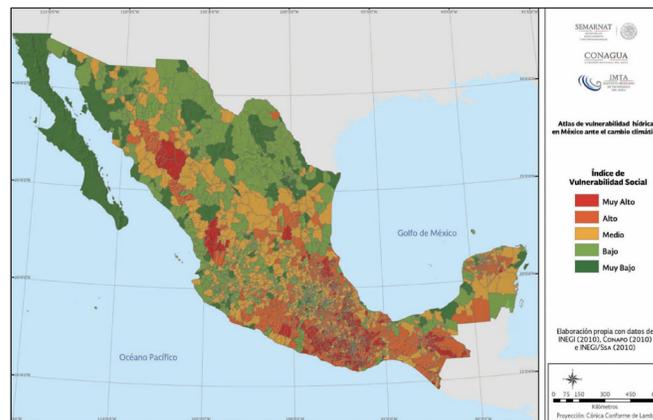
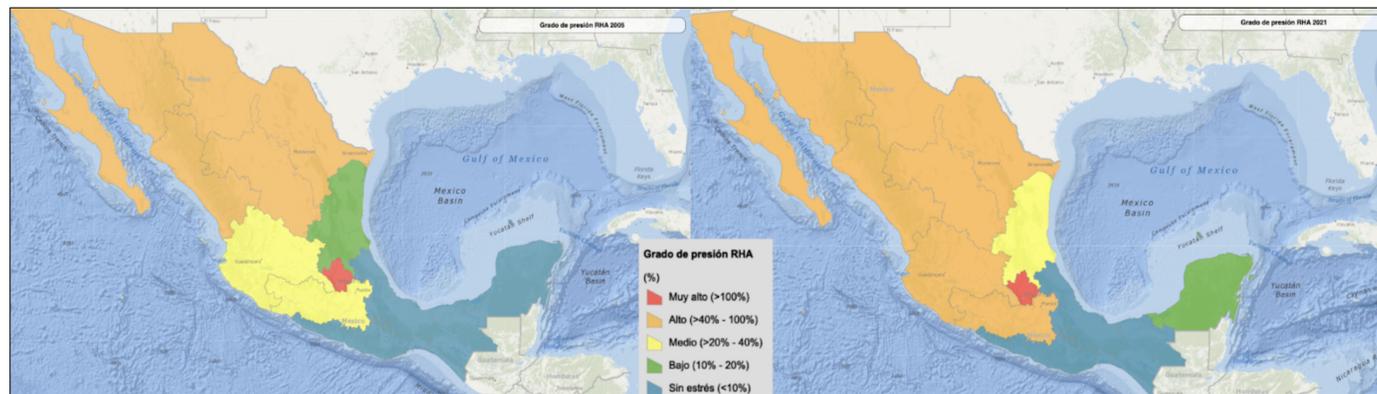


Figura 3: Índice de Vulnerabilidad por Municipio, del Atlas de Vulnerabilidad Hídrica de México ante el Cambio Climático (Arreguín-Cortés, 2015).

del IMTA, el 31% de los municipios del país están clasificados con “vulnerabilidad alta” y más del 14% con “vulnerabilidad muy alta” (Arreguín-Cortés, 2015) (Figura 3). Estas cifras deben analizarse con relación al 12% de la población mexicana ocupada que se dedica a actividades del sector primario (INEGI, 2022) que, a su vez, utilizan casi el 76% del agua dulce del país (CONAGUA, 2018).



Si a lo anterior se le añade el nivel de estrés hidrológico al que se enfrentan actualmente los estados (Figura 4), es evidente que la prevención y la planeación frente a las sequías es una prioridad para salvaguardar el bienestar de todos los mexicanos.

Figura 4: Comparación del grado de presión RHA del 2005 (izquierda) al 2021 (derecha), entendido como el volumen de extracción de agua media anual total para usos consuntivos del total de recursos hídricos renovables. Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua, CONAGUA.

Los impactos de las sequías no son inmediatos, sino que se propagan lentamente a través de los sectores sociales y productivos, llegando a tener

repercusiones económicas y de bienestar hasta años después de la catástrofe (Dobler-Morales y Bocco, 2021). Por ejemplo, como consecuencia de la sequía ocurrida en 2021 en el norte y centro-norte del país, el Banco de México estimó que las industrias agrícola, manufacturera y de suministro de agua llegaron a perder hasta 102 mil millones de pesos anuales (Hernández, 2022). Esto equivale casi al doble de la inversión realizada en el mismo

año para la construcción de escuelas en todo el país (Statista, 2023). Por ello, para evitar que las sequías tengan este tipo de repercusiones, es imperante trabajar en la disminución de la vulnerabilidad de los sistemas sociales y ecológicos del país y aumentar la resiliencia.

La resiliencia se entiende como la capacidad que tiene un sistema para absorber impactos externos sin perder funcionalidad, por lo que provee las herramientas necesarias para la renovación y reorganización dentro de contextos variables e impredecibles. Un sistema resiliente es capaz de sobrellevar los impactos de fenómenos como las sequías y, además, es sensible a las oportunidades de desarrollo e innovación (Rockström, 2003).

Incrementar la resiliencia a sequías de los sistemas, tanto sociales como ecológicos, implica mejorar la probabilidad que tienen los servicios ecosistémicos para regenerarse y seguir beneficiando a las actividades antropogénicas, como la agricultura y la ganadería. Ejemplos de mecanismos que favorecen la resiliencia son (1) los planes regionales de manejo y distribución de los recursos hídricos y del

suelo, donde se puede considerar el uso de sistemas de irrigación eficientes, el monitoreo subterráneo (Lalani, 2011), cambios en los calendarios de producción agrícola y reducción del área de cultivo para disminuir la erosión del suelo y su capacidad de captación pluvial (Dobler-Morales y Bocco, 2021); (2) la planificación para emergencias, como los bancos y reservas de alimentos locales y personales (Dobler-Morales y Bocco, 2021; Rockström, 2003); y (3) la diversificación de las actividades productivas rurales (Dobler-Morales y Bocco, 2021).

Parte de estas estrategias están incluidas en el Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE), que implementa medidas preventivas como el monitoreo de sequías en todo el país a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), atención a la población por medio de la Comisión Intersecretarial para la Atención de Sequías e Inundaciones (CIASI), la asignación de recursos del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) para ejecutar programas de manejo de agua y suelo federales y el establecimiento de un protocolo legal administra-

tivo que reconoce a las sequías como una emergencia nacional (Ortega-Gaucin et al. 2016).

No obstante, persisten algunos retos. Actualmente, la respuesta colectiva e individual se enfoca mayoritariamente en el contexto rural, mientras que el entorno urbano se ha dejado de lado (Dobler-Morales y Bocco, 2021). Por otra parte, las medidas de adaptación solo pueden prevenir los efectos de las sequías hasta cierto punto, por lo que salvaguardar y restablecer la integridad de los sistemas hídricos, como cuencas, ríos, presas y humedales, también debe ser una prioridad.

Conclusiones

Las sequías se transforman en desastres sociales únicamente cuando la resiliencia es tan baja que los sistemas no tienen capacidad para absorber los impactos de la misma (Rockström, 2003). Con el cambio climático progresivamente incrementando la intensidad y cantidad de las sequías, la implementación de estrategias para disminuir la vulnerabilidad de los sistemas sociales y ecológicos es cada vez más apremiante, pues de ello depende un impor-

tante porcentaje de la población mexicana ocupada en las actividades del sector primario. La comprensión de las vulnerabilidades de México, los patrones de las sequías y el nivel de manejabilidad de las mismas (Rockström, 2003) son la base para desarrollar medidas de mitigación para crear ciudades, comunidades y regiones resilientes e innovadoras. ♦

Referencias

- Arreguín-Cortés, F. (2015). Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el Cambio Climático. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- BANXICO. (2022). Sequía en México y su potencial impacto en la actividad económica. <https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/informes-trimestrales/recuadros/%7B3A0127A1-D0C9-7D61-C9AE-E57E127FB39B%7D.pdf>
- CONAGUA. (2018). Estadísticas del agua en México 2018. Mexico: Comisión Nacional del Agua.
- Dobler-Morales, C. y Bocco, G. (2021). Social and environmental dimensions of drought in Mexico: An integrative review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 55, 102067. [doi:10.1016/j.ijdrr.2021.102067](https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102067)
- Hernández, E. (2 de septiembre 2022). Sequía puede generar pérdida de 102 mil mdp a la industria y agricultura: Banxico. <https://www.forbes.com.mx/sequia-puede-generar-perdida-de-102-mil-mdp-a-la-industria-y-agricultura-banxico/>
- INEGI. (2022). Panorama general: censo agropecuario 2022. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- IMCO. (2023). Situación de agua en México. <https://imco.org.mx/situacion-del-agua-en-mexico/>
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- Lalani, B. (2011). Drought mitigation: Assessing technological trade-offs and challenges posed by policy solutions; A case study of Salamieh District, Syria. *World Applied Sciences Journal*, 13(4), 936-946.
- Ortega-Gaucin, D., López-Pérez, M., Arreguín-Cortés, F. (2016). Drought risk management in Mexico. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 6 (2), 161–170.
- Rockström, J. (2003). Resilience building and water demand management for drought mitigation. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28 (20-27), 869–877. [doi:10.1016/j.pce.2003.08.009](https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.08.009)
- Statista. (2023). Valor en la construcción de escuelas en México de 2012 a 2021. <https://shorturl.at/nyBY1>
- Velasco, I., Ochoa, L., Gutiérrez, C. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Región y sociedad*, 17(34), 35-71.

UN ESTUDIO DE CASO: LA ATENCIÓN DE LA SEQUÍA EN MONTERREY, NUEVO LEÓN

JOSÉ MARIO ESPARZA HERNÁNDEZ
SERVICIOS DE AGUA Y DRENAJE DE MONTERREY,
INSTITUCIÓN PÚBLICA DESCENTRALIZADA

Resumen

La Organización de las Naciones Unidas señaló recientemente que las sequías debidas al cambio climático suponen un desafío a los modos de vida. Unas 3 mil 600 millones de personas tienen un acceso inadecuado al agua al menos un mes al año y se espera que esta cifra aumente a más de 5 mil millones para el 2050.

En el caso de Nuevo León, ante la falta de lluvias por un prolongado tiempo y la baja captación de agua en dos de las tres presas más importantes que suministran a la población de su Zona Metropolitana (La Boca y Cerro Prieto), el gobierno emitió una declaratoria de emergencia en febrero de 2022.

Como respuesta ante este fenómeno, actualmente se implementa el Plan Maestro para garantizar el agua de Nuevo León hasta el 2050. Entre las acciones incluidas destacan: rehabilitación, incorporación y perforación de más de 100 pozos someros; desazolve y limpieza de la Presa La Boca; bombardeo de nubes con yoduro de plata; incremento de los frentes de trabajo para acelerar la construcción de la Nueva Presa “Libertad”; construcción del acueducto “El Cuchillo II”, que permitirá incrementar en 5 mil litros por segundo la capacidad de extracción para uso público.



Introducción

Reza un refrán en Monterrey, Nuevo León: “Si no le gusta el clima, vuelva en una hora”. Sin duda, la frase refleja el constante cambio del clima que se vive en la región, perteneciente a la llanura costera del Golfo Norte, donde prevalece un clima seco y semiseco.

Además, la entidad federativa, considerada la capital industrial de México, se encuentra en una zona sujeta a actividad ciclónica, por lo que una eficiente gestión de sus recursos hídricos es fundamental para mantener la calidad de vida de una población cada día más creciente y demandante de los servicios de agua potable.

La más reciente crisis del agua en Nuevo León se presentó en 2022. La falta de lluvias en la región ocasionó que dos de las tres presas más importantes que abastecen a la Zona Metropolitana de Monterrey (La Boca y Cerro Prieto), registraron en febrero niveles de un dígito porcentual, por lo que el Gobierno del Estado emitió una declaratoria de emergencia ante la sequía extrema.

Desarrollo

De acuerdo con la mayoría de las enciclopedias o diccionarios de habla hispana la sequía se define como “una deficiencia de precipitaciones durante un periodo de tiempo relativamente prolongado”. De hecho, la Real Academia Española la define tan solo como: “*Tiempo seco de larga duración*” (RAE, s.f., definición 1).

Sin embargo, como lo señala Marcos-Valiente (2001): “*Cuando se precisa el momento de inicio, finalización e intensidad de la sequía hablamos de definiciones operacionales*” (p. 60), para las cuales se requieren conocimientos más detallados del fenómeno climático.

Debido a su ubicación geográfica en la zona norte del país, Nuevo León ha sido afectado históricamente por sequías recurrentes e inundaciones que han propiciado diversas crisis del agua. La cuarta de ellas fue registrada en 1948 (Esparza et al., 2014) y ocasionó que, por primera vez en la historia de Monterrey, se tomará la medida de racionar el agua a quienes tenían el privilegio de contar con una toma domiciliaria.

“se reafirmaba la estrategia principal de traer agua de fuentes remotas, y la complementaria de abastecerse de agua mediante alumbramiento de nuevos pozos profundos, y cobró mayor importancia el agua freática. Sin duda alguna se iniciaba la carrera por el agua profunda del área urbana de Monterrey” (Esparza et al., 2014).

En el Plan Hídrico Nuevo León 2050 realizado por el Fondo de Agua Metropolitano de Monterrey muestra que, al menos, se han registrado seis periodos de sequía altamente extendidos en el tiempo, de acuerdo con registros de precipitación media mensual del período 1950 a 2014. *“De 1950 a 1957 corresponde al periodo de sequía más extendida de la historia registrada; consta de prácticamente ocho años con índices que se conservan significativamente por debajo de la media de precipitación”* (Fondo de Agua Metropolitano de Monterrey, 2018). Y es que entre 1959 y 1966, apenas después de un breve tiempo de humedad, se tuvo un segundo periodo extendido de sequía. Dicha etapa, indica el organismo, ha sido la más devastadora y solo se pudo

solventar por el arribo del Huracán Beulah en 1967, que también provocó severas inundaciones.

De ello también da cuenta Ortega-Gaucin (2013), al señalar que durante esos años *“las presas estaban secas. El ganado moría de sed. Hubo pérdidas económicas en la ganadería y la agricultura (maíz, algodón, frijol y bosques, entre los más afectados). De no llover, se preveía en Nuevo León la emigración de miles de campesinos. 81 personas murieron.”* (2013)

La crisis del agua 2022

Diversos investigadores coinciden en que la crisis del agua registrada en 2022 en Nuevo León fue producto de diversas circunstancias. Por un lado, la falta de lluvias, pero también el cambio climático, el crecimiento poblacional -que pasó de 2.7 millones de personas en 1990 a 5.7 millones para 2020-, la ausencia de una política de gestión sostenible del agua, la falta de inversión en infraestructura, la escasa utilización de nuevas tecnologías para la detección de fugas y la ausencia de una política pública hacia una Nueva Cultura del Agua que inci-

diera en un auténtico cambio de comportamiento de los usuarios de la red de agua potable.

Todo ello propició una “tormenta perfecta” para la presentación de una crisis que, sin duda, ha dejado muchas enseñanzas a la población regiomontana. Nadie quiere volver a quedarse sin agua en casa o tener que despertarse temprano para recolectar agua en tinas y dosificarla durante el día para cubrir sus necesidades básicas debido a los cortes programados; tener que bañarse “de bote-cito”; hacer fila para acarrear agua de los tinacos comunitarios que se instalaron como medida de atención emergente o comprar agua embotellada para el consumo humano; entre otras acciones.

Ante ello, el gobierno de Nuevo León implementó una serie de acciones para enfrentar el reto de garantizar y suministrar agua potable a toda la población, los comercios y los servicios del estado, así como agua residual tratada de calidad para la industria y el riego de áreas verdes.

El Plan Maestro para garantizar el agua de Nuevo León hasta el 2050 se divide en tres fases: (Gobierno del Estado de Nuevo León, s.f)

La primera, implementada en el 2022, fue de acciones inmediatas para responder ante la situación emergente. Destaca la declaratoria de emergencia por sequía; la rehabilitación, incorporación y perforación de más de 100 pozos someros; el desazolve y limpieza de la Presa La Boca; el bombardeo de nubes con yoduro de plata; y el incremento de los frentes de trabajo para acelerar la construcción de la nueva Presa “Libertad”, misma que contará con capacidad de 220 millones de metros cúbicos, que se traducen en 1.6 m³/s.

La segunda fase, que actualmente se encuentra en marcha, consiste en construir 132 nuevos pozos de baja profundidad y rehabilitar los que ya existen; además del desarrollo de 3 subsistemas de 29 pozos profundos en diferentes puntos del área metropolitana de Monterrey y zona conurbada; la instalación de un sistema de administración inteligente del agua a partir del uso de la tecnología en modulación de presiones, que este año 2023 ayudará a incrementar la eficiencia de la red de distribución en 2,000 lps, además de identificar fugas y automatizar procesos; la construcción de infraes-

estructura para acceder de manera emergente y bajo un esquema de operación parcial en la unidad de riego “El Chapotal”; adecuaciones de la infraestructura de saneamiento para garantizar las condiciones para el reúso de agua con el fin de contar con 3,000 lps; y la construcción de un segundo acueducto desde la presa “el Cuchillo”, que permitirá incrementar en 5 mil litros por segundo la capacidad de extracción para uso público.

La fase tres considera la proyección en el mediano y largo plazo bajo un esquema que garantice la gestión oportuna de las inversiones con una visión basada en la sostenibilidad, para ello, se establece un perfil técnico en la Dirección Adjunta del organismo operador con la incorporación de nuevas áreas, como las Coordinaciones de Gestión Estratégica y de Planeación Hídrica, así como la Gerencia de Fuentes de Abasto Superficiales y Subterráneas. Éstas permiten un monitoreo y calibración semanal de la red de distribución con un enfoque sistémico, derivando en la integración del Grupo Técnico de Operación de Fuentes de Abasto de Agua (GTOFAA). Además, destaca la implemen-

tación de la denominada “mesa del agua”, donde se genera la revisión de los compromisos técnicos estratégicos con el Gobernador del Estado, la Comisión Nacional del Agua, Secretarios Estatales involucrados, y personal técnico de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey.

Conclusiones

La sequía y escasez de agua no es novedad para Nuevo León, una comunidad fundada en una zona árida y semiárida. Desde su fundación, la población ha enfrentado sequías e inundaciones, eventos que han propiciado un fortalecimiento en la identidad regiomontana y su solidaridad.

Para atender las condiciones adversas que se presentan en la entidad, es necesario el compromiso al más alto nivel, considerando la participación de las autoridades federales y estatales desde el ejecutivo al legislativo.

Resulta de vital importancia gestionar el agua desde la concepción de un modelo sustentable y el establecimiento de una política pública hacia una Nueva Cultura del Agua entre la población. 🔥

Bibliografía

Esparza, L.G., Valdés, C., Cantú, P.C. y De la Mora, G. (2014). Historia de las crisis del agua en el área metropolitana de Monterrey (AMM), previa a la llegada de las grandes represas (1597-1955). *Ciencia UANL*, 67, 37-51.

Fondo de Agua Metropolitano de Monterrey. (2018). Plan Hídrico Nuevo León 2050. <http://famm.mx/wp-content/uploads/2018/10/Plan-H%C3%ADdrico-NL-2050.pdf>

Gobierno del Estado de Nuevo León. (s.f.) Plan maestro para garantizar el agua de Nuevo León hasta el 2050. <https://planaguanl.mx/>

Ortega-Gaucin, D. (2013). Impacto de las sequías en Nuevo León. *Ciencia UANL*, 63, 8-14.

Marcos-Valiente, O. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, 26, 59-80.

Real Academia Española. (s.f.) Sequía. En Diccionario de la Lengua Española. <https://dle.rae.es/sequ%C3%ADa>

HACIA UNA GESTIÓN INTEGRAL DE RECURSOS HÍDRICOS ANTE SEQUÍAS PARA LA ZMVM: ENFOQUE TRANSDISCIPLINARIO DESDE LA COMPLEJIDAD

NORMA ELIZABETH OLVERA FUENTES
CARLOS GAY GARCÍA

INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO, UNAM



Resumen: El incremento en la frecuencia y severidad de las sequías como consecuencia del cambio climático, exacerba las problemáticas hídricas en los sectores: social, ambiental y económico, particularmente en megaurbes como la Zona Metropolitana de la Ciudad de México cuyo acceso a recursos hídricos es muy limitado. Esta megaciudad, como en muchas más alrededor del mundo, recurre a la sobreexplotación de sus mantos acuíferos y de sistemas periféricos hídricos, estableciendo un proceso acelerado de agotamiento de sus recursos hídricos presentes. A partir de un mapa cognitivo difuso que modela el sector social, se muestra la plausibilidad de alejar a la ZMVM de su colapso hídrico

Palabras clave: Enfoque sistémico, exploración de escenarios, mapas cognitivos difusos, medidas de intervención.

1.Introducción

¿Cómo se pueden planear y ejecutar medidas de acción estratégicas, integrales y efectivas para enfrentar sequías severas, más aún, cuando estás asolan centros urbanos con decenas de millones de habitantes? La importancia de dar respuesta a esta pregunta queda de manifiesto al tener presente que, cada día, la inequidad en el acceso a los recursos hídricos profundiza: la marginación y pobreza; exclusión e injusticia social; desigualdad de género;

incremento en la vulnerabilidad de las comunidades, en especial las indígenas; así como graves problemas de salud y conflictos sociales, entre muchas otras problemáticas. Puesto que la gran mayoría de las ciudades carecen de una infraestructura robusta que les permita hacer un uso eficiente, y sustentable del agua, en mayor o menor medida, las problemáticas referentes a la gestión de los recursos hídricos se acentúan considerablemente en todas las mega urbes alrededor del mundo, situación que ya desde este momento compromete sus recursos hídricos presentes y futuros (Vorosmarty *et al.*, 2000; Varis *et al.*, 2006). La ya creciente emergencia hídrica mundial se acelera a causa del incremento en la frecuencia y severidad de las sequías como consecuencia del cambio climático, lo que impacta drásticamente los sectores: social, ambiental y económico (Gay *et al.*, 2015; Masson-Delmotte *et al.*, 2021). Estos retos se magnifican en aquellas megaciudades, como ocurre en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMVM), que por su ubicación geográfica —región catalogada ente árida y semiárida— tienen un acceso muy limitado a recursos

hídricos, los cuales a su vez son altamente vulnerables a fenómenos meteorológicos extremos, como son las sequías. Aunado a lo anterior, el crecimiento poblacional y por ende incremento en la demanda de consumo de recursos hídricos es un factor de alto impacto que agrava su vulnerabilidad hídrica. Actualmente, la ZMVM demanda 5, 270,400 m³ de agua potable para ser distribuidos entre su población —aunque no en forma equitativa—, la cual es superior a los 22 millones de habitantes. Para ello, la ZMVM recurre a la sobreexplotación de sus mantos acuíferos y del sistema Lerma-Cutzamala, ambos procesos no sustentables ni ecológicamente amigables, que incrementan cada día la vulnerabilidad de sus recursos hídricos presentes y futuros, más aún, ante la ocurrencia de sequías severas.

El diseño y ejecución de una gestión estratégica integral de recursos hídricos que pueda afrontar las numerosas y complejas problemáticas hídricas de la ZMVM debe fundamentarse no en la búsqueda de soluciones que involucren una sola perspectiva, como podría ser la ingenieril, pues de omitirse el contexto en el que están inmersas las diversas pro-

blemáticas, podría ocurrir que la gestión hídrica no sea ni siquiera amigable con el medio ambiente, asequible económicamente y equitativa con la sociedad. Es así, que una gestión integral ante sequías debe de abordarse desde su totalidad, esto es, desde una visión sistémica, la cual se caracteriza por considerar en el planteamiento del problema y correspondiente solución: los aspectos más relevantes; una visión transdisciplinaria; y su adaptación continua como consecuencia de su evolución en el tiempo (Churchman, 1968; Nicolescu, 2002). El enfoque sistémico permite visualizar los centros urbanos como sistemas altamente complejos, cuya crisis hídrica actual exacerbada por las sequías aparece como consecuencia de las interacciones entre todos sus componentes y de estos con el entorno, generándose propiedades emergentes, esto es, características únicas derivadas del sistema como una entidad indivisible (Mitchell, 2009; Lara-Rosano, Cano y Márquez, 2022). Dentro del campo de la complejidad, los mapas cognitivos difusos (MCD) son una de las herramientas teórico-metodológicas más fructíferas que permiten analizar la evolución

de sistemas complejos manejando con naturalidad la falta de información o su incertidumbre (Kosko, 1986; Ross, 2009), siendo una herramienta particularmente útil en la exploración de escenarios (Jetter y Kok, 2014).

2. Desarrollo

A partir de una exhaustiva revisión de referencias arbitradas, Olvera-Fuentes y Gay-García (2022) establecieron relaciones de causalidad entre seis problemáticas fundamentales a considerar para el subsistema social del servicio de abasto de agua de la ZMVM ante el escenario en que se presente un decremento en la precipitación. Las relaciones de causalidad se representan por medio de flechas, y su efecto puede ser tanto positivo como negativo. Un aumento en los recortes de suministro de agua (S3) incrementa el deterioro de la salud en la población (S5), a su vez, un decremento en la precipitación (C2) genera una disminución en el crecimiento industrial, poblacional y turístico, estos son ejemplos de causalidad positiva y negativa respectivamente. La causalidad negativa se señala

con un signo menos. Tomando como referencia este modelo, se incluye la medida de intervención: incrementar el reuso o reciclaje del agua (I2) (Véase Figura 1). A partir del establecimiento de estas nuevas relaciones de causalidad, se construye la matriz adyacente y aplicando la regla de inferencia de Kosko (1986) se analiza la evolución de este sistema manteniendo como forzante el incremento en la temperatura (C1) y la medida de intervención (I2).

3. Resultados y discusión

Al comparar la evolución del sistema sin y con intervención, (Véase Figura 2), se observa que las problemáticas: Aumento de la vulnerabilidad de las comunidades (S6), deterioro de la

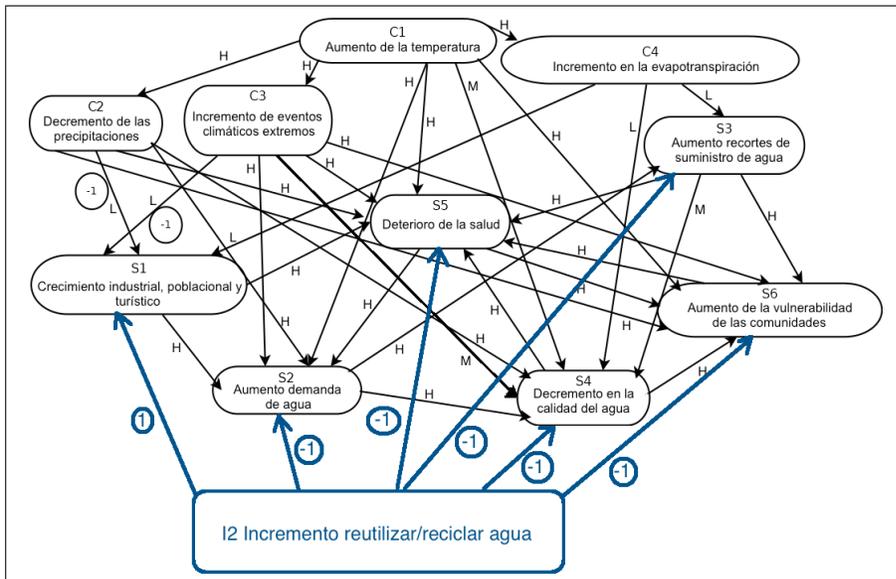


Figura 1. La intervención y nuevas relaciones de causalidad incorporadas al modelo de Olvera-Fuentes y Gay-García se muestran en color azul.

salud (S5), decremento en la calidad del agua (S4) y el aumento en la demanda del agua (S2) se alejan ligeramente del colapso. Por su parte se muestra una disminución notable en el aumento de recortes de suministro de agua (S3) y se favorece un crecimiento industrial, poblacional y turístico, hídricamente más sostenible.

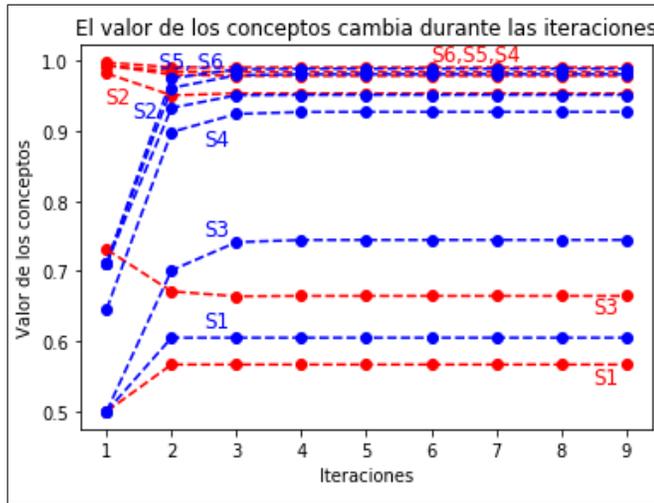


Figura 2. La evolución temporal de las problemáticas del sistema social sin intervención se muestra en color azul y con intervención en color rojo. El máximo valor en gravedad corresponde a uno.

Como puede verse una sola medida de intervención, si bien favorece al subsistema social, no es suficiente para alejarlo de su colapso. Por lo cual es imperioso, integrar un mayor número de medidas de intervención estratégicas para garantizar la

seguridad hídrica de la región y con ello salvaguardar su estabilidad hídrica presente y futura. Para iniciar y concretar este proceso se requiere el establecimiento de diálogos con los tomadores de decisiones, y la representación de todos los sectores de la sociedad, particularmente las más vulnerables, con la finalidad de obtener aportaciones desde la multi, inter y transdisciplinariedad.

4. Conclusiones

Por la complejidad de la crisis hídrica en la ZMVM, vista como una propiedad que emerge de las diversas y entrelazadas problemáticas actuales, así como por los severos impactos del cambio climático, se requiere de la consolidación de una gestión integral hídrica eficiente ante sequías. Los mapas cognitivos difusos son un marco teórico-metodológico propicio para el diseño y evaluación en la construcción de esta gestión, puesto que permite integrar en su modelación tanto información cuantitativa como cualitativa, con lo cual se puede incorporar valiosa información proporcionada por los tomadores de decisiones y todos los sectores de la sociedad,

particularmente los más vulnerables. Los mapas cognitivos difusos permiten desde la multi, inter y transdisciplinariedad planear, explorar y evaluar distintos escenarios con la finalidad de construir una gestión hídrica integral. La incorporación de los MCD en el diseño de políticas públicas aportará al proceso de gestión sustentable de recursos hídricos que haga frente a los impactos del cambio climático, con lo cual se cimentará una transformación estratégica que brinde un acceso justo y equitativo al agua. 💧

Agradecemos al Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC), UNAM, el financiamiento recibido para llevar a cabo esta investigación.

Bibliografía

- Churchman, C. W. (1968). *The systems approach*. Dell Publishing Company.
- Gay, C., Rueda, J. C., Ortiz, B., Muñoz, N. y Le Bail, M. (Coords.). (2015). *Reporte mexicano de cambio climático*. UNAM.
- Jetter, A. J., y Kok, K. (2014). Fuzzy Cognitive Maps for futures studies—A methodological assessment of concepts and methods. *Futures*, 61, 45-57.
- Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. *International journal of man-machine studies*, 24(1), 65-75.
- Lara-Rosano, F., Cano, A. G., y Márquez, S. A. (2022). *Teorías, métodos y modelos para la complejidad social: Un enfoque de sistemas complejos adaptativos*. UNAM.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Loonoy, E., Mathews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelecki, O., Yu, R., y Zhou, B. (Editors). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour*. Oxford University Press.
- Nicolescu, B. (2002). *Manifiesto of transdisciplinarity*. Suny Press.
- Olvera-Fuentes, N. E., y Gay-García, C. (2023). Fuzzy cognitive maps to explore the repercussions of less precipitation on the water supply service of the Mexico City Metropolitan Area. *Atmósfera*, 36(2), 299-316.
- Ross, T. J. (2009). *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons.
- Varis, O., Biswas, A. K., Tortajada, C., y Lundqvist, J. (2006). Mega-cities and water management. *Water Resources Development*, 22(2), 377-394.
- Vorosmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., y Lammers, R. B. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289(5477), 284-288.

LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL MONITOREO, EVALUACIÓN Y PRONÓSTICO DE SEQUÍAS: UN EJEMPLO

JOSÉ C. DOURIET

AMH_SINALOA /SHP, CULIACÁN, MÉXICO

ALDO I. RAMIREZ

ITESM, MONTERREY, MÉXICO

ANDRÉS C. RAVELO

CREAN-CONICET, CÓRDOBA, ARGENTINA



Resumen

Se presentan conceptos básicos sobre el uso de metodologías de Inteligencia Artificial aplicada al caso del análisis de sequías, especialmente en el monitoreo, evaluación y pronóstico. Como ejemplo, se aplica en las cuencas correspondientes al Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN), localizado en la Región Noroeste de México, el cual es afectado frecuentemente por sequías de diferente magnitud. El documento ilustra la aplicación de redes neuronales artificiales para el monitoreo de las sequías

meteorológicas e hidrológicas y se pronostica su ocurrencia con una antelación de 1 a 3 meses. Asimismo, se introduce una guía paso a paso para el análisis multivariado temporal y pronóstico de sequías hidrológicas mediante el uso de redes neuronales, variables meteorológicas, volúmenes de escurrimiento e índices de sequía hidrológica (SDI). Mediante el caso de estudio se demuestran las bondades del uso de estas herramientas.

Introducción

Las sequías se presentan recurrentemente en diversas partes del mundo, con fuertes impactos económicos, sociales y ambientales. Estos fenómenos incidieron en buena medida en el desabasto y en las crisis hídricas de los últimos años en grandes ciudades como Sao Paulo en Brasil, Ciudad del Cabo en Sudáfrica, Las Vegas en Estados Unidos y Monterrey en México. La sequía es un fenómeno que debe estudiarse con detalle puesto que se estima que para 2050 más de la mitad de la población mundial podría sufrir de escasez de agua, lo cual se asociaría también a las sequías.

La sequía es un fenómeno natural que se origina por la deficiencia en la precipitación sobre un periodo extendido de tiempo. Es una anomalía temporal que puede suceder en casi todas las zonas climáticas, aún aquellas que tengan exceso de precipitaciones. Las sequías se distinguen de la aridez, porque ésta solo está relacionada con regiones de baja precipitación y es una característica permanente del clima. La deficiencia de precipitaciones por debajo de las normales ocasiona una escasez de

agua para el desarrollo de actividades agro-productivas, industriales y sociales, afectando a todos los sectores de la población. Más allá de los costos productivos y monetarios, los impactos de la sequía en la sociedad perjudican a toda la economía y afectan negativamente el medio ambiente, produciendo desequilibrios ecológicos con consecuencias difíciles de revertir. Ante ello, los sectores públicos y privados deben tomar medidas que ayuden a mitigar los efectos de una sequía (Ravelo, 2012). Estos eventos se presentan frecuentemente en diversas partes del mundo, con fuertes impactos en lo económico, social y ambiental (Velasco, 2002).

Típicamente, la sequía se ha estudiado con enfoques convencionales, tales como el análisis estadístico, los modelos hidrológicos de precipitación y escurrimiento, el uso de sensores de humedad de suelo y plantas, y los índices de sequía. Más recientemente se incorporó al bagaje técnico los métodos basados en percepción remota, tales como el análisis e interpretación de imágenes de satélite. Estos métodos se han usado por décadas y aún son de amplia aplicación. Sin embargo, otras tecnologías

emergentes, entre las que destaca la Inteligencia Artificial, constituyen nuevas y mejores herramientas para entender el fenómeno y, sobre todo, pronosticar las sequías.

La Inteligencia Artificial (IA) ha sido empleada para el análisis de sequías, dando valor a la estimación y eventual prevención de sus impactos. La IA puede procesar grandes cantidades de datos y encontrar patrones difícilmente detectables mediante métodos convencionales (Forbes, 2020).

Los principales temas de estudio con relación a la aplicación de la IA en sequías incluyen: el monitoreo, el pronóstico de su inicio y duración, la evaluación del impacto en diferentes sectores y la gestión del recurso, el apoyo a la toma de decisiones, y, en general, la gestión de los riesgos asociados con el fenómeno.

Una de las áreas de mayor actividad es el análisis de datos históricos con modelos de aprendizaje automático para identificar tendencias o patrones y usarlos como base del pronóstico. Estos métodos también pueden incorporar otras fuentes de información como datos de estaciones meteorológicas o

imágenes de satélite o radar para generar un mejor análisis de la sequía en una región específica.

Entre los principales métodos enmarcados en el concepto de IA usados en hidrología y, particularmente, en sequías, se encuentran las siguientes:

- a. Redes neuronales. Útiles para el reconocimiento de patrones y el análisis de imágenes.
- b. Algoritmos genéticos. Analogía de la evolución biológica para abordar problemas complejos.
- c. Aprendizaje automático (o *machine learning*). Sistemas que aprenden de los datos y de los procesos.
- d. Sistemas expertos. Imitan el comportamiento y la toma de decisiones del ser humano.

En este documento se presenta como ejemplo el uso de redes neuronales artificiales para el monitoreo y pronóstico de las sequías, utilizando como caso de estudio las cuencas que corresponden al Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN). Este organismo se localiza en la Región Noroeste de México, que ha sido afectada frecuentemente por eventos de sequía de gran severidad, como las

ocurridas en los períodos 1977-1980, 1988-1994, 1999-2004 y 2011-2013 (Douriet, 2017). El enfoque y resultados presentados son parte del proceso de una investigación doctoral presentada en la Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Córdoba, Argentina (Douriet, 2017).

Desarrollo

El área de estudio está comprendida por las cuencas que corresponden al Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN). Las sequías afectan grandes extensiones espaciales, por tanto, la unidad adecuada de gestión es la cuenca (Ravelo, 2008). La región tiene una extensión total de 152,007 km², que corresponden al 8 % del territorio de México (Figura 1).

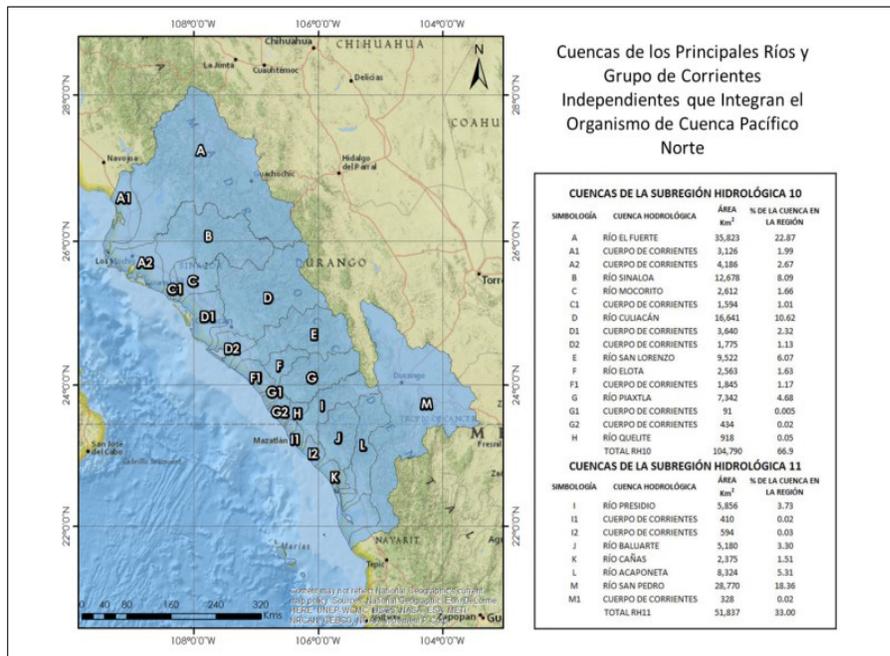


Figura 1.- Mapa de cuencas de los principales ríos y grupo de corrientes independientes que integran el OCPN.

En la RHAIIPN existen 16 embalses principales con una capacidad total de 22,924.6 hm³, siendo la presa Luis Donaldo Colosio (Huites) la de mayor capacidad.

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García (1981), y sobre la base de las condiciones particulares de la República Mexicana (www.ineter.gob.mx), el clima que prevalece en el Organismo de Cuenca Pacífico Norte es variado, desde el frío hasta el cálido húmedo.

El establecimiento o determinación de las fases de las sequías se realiza mediante índices meteorológicos e hidrológicos. Los usados en este trabajo fueron:

- Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) a diferentes escalas de tiempo (McKee et al., 1993)
- Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) (Palmer, 1965)
- Índice Normalizado de diferencia de la Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés) (Ravelo, 2008).

Además, se requirió la generación de una base de datos meteorológicos, edafológicos y agrológicos correspondientes a la zona en estudio, y se empleó el Sistema Operativo de Sequías (SOS) del Proyecto

de Sequías del OCPN (Ravelo, 2008), el cual estima en forma automatizada los valores de los índices y grafica los planos de la variabilidad espacial de la sequía. Se utilizó también el Sistema de Información Geográfica IDRISI para el manejo de las imágenes satelitales y para la determinación del índice NDVI.

En la evaluación de las características físicas de la sequía, mediante los valores del SPI a diferentes escalas de tiempo y su representación espacial, se utilizó la clasificación propuesta por Hayes et al. (1999), quienes partieron de la escala original de McKee et al. (1993). Ésta se ilustra en la Tabla 1.

Los índices hidrológicos utilizados para caracterizar las sequías hidrológicas fueron: el índice de Sequía de Ecurrimientos (SDI, por sus siglas en inglés), propuesto por Nalbantis (2008), y el Índice de Estado de las Presas (Ie) que fueron propuestos por MMAE y adaptado por Ortega (2016). La clasificación de rangos propuesta para estos dos índices es la mostrada en la Tabla 2.

Para la aplicación de la metodología primero se realizó una crítica de datos y un control de calidad de los mismos, a través de métodos tanto gráficos

Tabla 1: Clasificación de rangos de valores del SPI, PDSI y NDVI (Ravelo, 2009; Ravelo, 2012)

Referencias SPI		Referencias PDSI		Referencias NDVI	
2,00 ó mayores	Humedad Extrema	4,00 ó mayores	Humedad Extrema	> +2sd	Muy buenas condiciones
1,99 a 1,50	Humedad Excesiva	3,00 a 3,99	Humedad Excesiva	+2sd a +1sd	Buenas condiciones
1,49 a 1,00	Humedad Moderada	2,00 a 2,99	Humedad Moderada	+1sd a Media	Normal
0,99 a 0,50	Humedad Incipiente	1,00 a 1,99	Humedad Incipiente	Media a -1sd	Sequía ligera
0,49 a -0,49	Normal	-0,99 a 0,99	Normal	-1sd a -2sd	Sequía moderada
-0,50 a -0,99	Sequía Incipiente	-1,00 a -1,99	Sequía Incipiente	<-2sd	Sequía severa
-1,00 a -1,49	Sequía Moderada	-2,00 a -2,99	Sequía Moderada		
-1,50 a -1,99	Sequía Severa	-3,00 a -3,99	Sequía Severa		
-2,00 ó menores	Sequía Extrema	-4,00 ó menores	Sequía Extrema		

Tabla 2: Clasificación de rangos de valores del SDI e índice de estado (I_e)

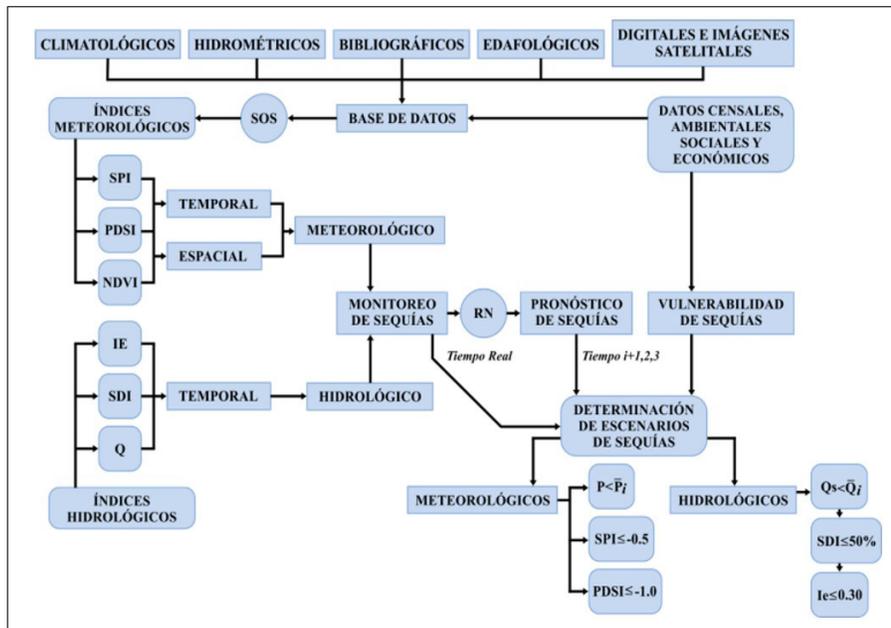
Estado	Descripción	Criterio	Probabilidad (%)	Valor del índice	Nivel	Situación
4	Humedad Extrema	$SDI \geq 4,0$	2,3	$I_e > 0,50$	Verde	Estable o de normalidad
3	Humedad Intensa	$3,0 < SDI \leq 4,0$	4,4	$0,50 \geq I_e > 0,30$	Amarillo	Prealerta
2	Humedad Moderada	$2,0 < SDI \leq 3,0$	9,2	$0,30 \geq I_e > 0,15$	Naranja	Alerta
1	Humedad Ligera	$1,0 < SDI \leq 2,0$	34,3	$I_e \leq 0,15$	Rojo	Emergencia
0	Normal	$-1,0 < SDI \leq 1,0$	50			
1	Sequía Ligera	$-2,0 < SDI \leq -1,0$	34,1			
2	Sequía Moderada	$-3,0 < SDI \leq -2,0$	9,2			
3	Sequía Intensa	$-4,0 < SDI \leq -3,0$	4,4			
4	Sequía Extrema	$SDI \leq -4,0$	2,3			

como estadísticos. Se consideraron los registros mensuales de precipitación, temperatura y evaporación, así como los gastos y volúmenes de escurrimiento mensuales. En cuanto a las presas, se emplearon los volúmenes mensuales de ingreso y de egreso, los niveles de almacenamiento alcanzados al primer día de cada mes y los datos agrícolas puntuales de humedad del suelo.

La metodología para el monitoreo, pronóstico y la determinación de escenarios por sequía mediante el Análisis Multivariado Temporal usando Redes Neuronales se describe con base en el diagrama del proceso para la determinación de escenarios por sequía (Figura 2).

El método consiste en seleccionar el área de estudio y las estaciones climatológicas, hidrométricas y presas con información suficiente y de calidad para el análisis de las sequías meteorológicas e hidrológicas, tanto temporal como espacial. Enseguida, se compila y prepara la base de datos hidroclimatológicos, hidrométricos, edafológicos, digitales y de imágenes satelitales, bibliográficos, censales, ambientales y economi-

Figura 2. Metodología propuesta para el análisis de escenarios de sequías.



cos. Con los datos, se estiman los índices de sequías meteorológicas SPI a diferentes escalas de tiempo y PDSI, obteniendo valores puntuales de los índices por localidad y mapas de variabilidad espacial de la sequía para un mes específico, obtenido por interpolación mediante el método

de Kriging (Zavaleta, 2010); y los índices NDVI se estiman con el programa IDRISI, los cuales proporcionan información sobre la variabilidad espacial de la sequía meteorológica y agrológica.

De igual manera, se determinan los índices hidrológicos SDI e Índice de Estado (Ie). Con los datos de los volúmenes de escurrimiento Q y los índices del SPI se monitorean y caracterizan a las sequías hidrológicas temporal y espacialmente. Con la información resultante y los datos censales, ambientales, sociales y económicos se estiman la vulnerabilidad y riesgo de sequías por cuenca y municipios que integran el OCPN. En la estimación de la vulnerabilidad se utilizó la metodología propuesta por Ravelo (2012),

determinando con ello escenarios de sequías meteorológicas e hidrológicas actuales e históricas (tiempo *i*) para diferentes condiciones de clima (escenarios climáticos).

Los índices meteorológicos e hidrológicos históricos estimados se utilizan para pronosticar, mediante redes neuronales, las condiciones de sequía para los siguientes tres meses.

Para el diseño de la red neuronal destinada a resolver un problema concreto es conveniente disponer de programa de computación. Con un programa disponible de este tipo basta con pensar en términos de redes y no en programación de algoritmos utilizando lenguajes de alto nivel. De esta manera, el esfuerzo se debe dirigir al diseño de la arquitectura o estructura de la red y en la selección de los datos del conjunto de entrenamiento y de prueba (Basogain, 2009).

Las fases más importantes en la aplicación de los modelos de redes neuronales son: entrenamiento, prueba, validación, extensión o pronóstico (predicción) y evaluación de resultados (Bocco et al., 2013). La selección de la RNA depende si se va

a predecir, asociar o clasificar; en este caso, el tema es la predicción de índices de sequía meteorológica e hidrológica. El entrenamiento de la RNA para predicción es del tipo Supervisado (Basogain, 2009).

Con base en lo anterior, se construyó la red para el pronóstico de sequías meteorológicas (Ravelo et al., 2014) a través de los siguientes pasos:

- a. Desarrollar el archivo con los índices de sequía estimados para el monitoreo, que servirán de insumo al programa *Neurosolutions for Excel*.
- b. Efectuar corridas de entrenamiento, prueba y validación, de acuerdo a las indicaciones del manual.
- c. Crear una nueva red neuronal -o abrir una existente- y elegir el tipo de red. En este caso Multilayer perceptron con 6 neuronas de entrada – seis meses previos-, una capa oculta con cuatro neuronas y una capa de salida con una neurona – el índice a estimar.
- d. Guardar en archivo de computadora la red generada.
- e. Ejecutar el entrenamiento de la red.
- f. Llevar a cabo la validación (*testing*).

Posteriormente, se realizó una evaluación del pronóstico de la sequía meteorológica mediante métodos estadísticos y el uso de los Programas InfoStat (www.infostat.com.ar) y [Errores.xlsx](#) (CREAN, 2016) para cada una de las series de índices pronosticados, determinando su grado de ajuste o de error (Dawson y Wilby, 2001). En la Figura 3 se muestra el diagrama de la estructura de RNA utilizada para el pronóstico de sequías hidrológicas.

Los tipos y arquitecturas de RNA aplicadas fueron: Perceptron, Perceptron Multicapa (Multilayer Perceptron), Redes Recurrentes (Red de Hopfield, Red Multicapa), Multicapa Feedforward, Modular Neural Network, y Principal Component

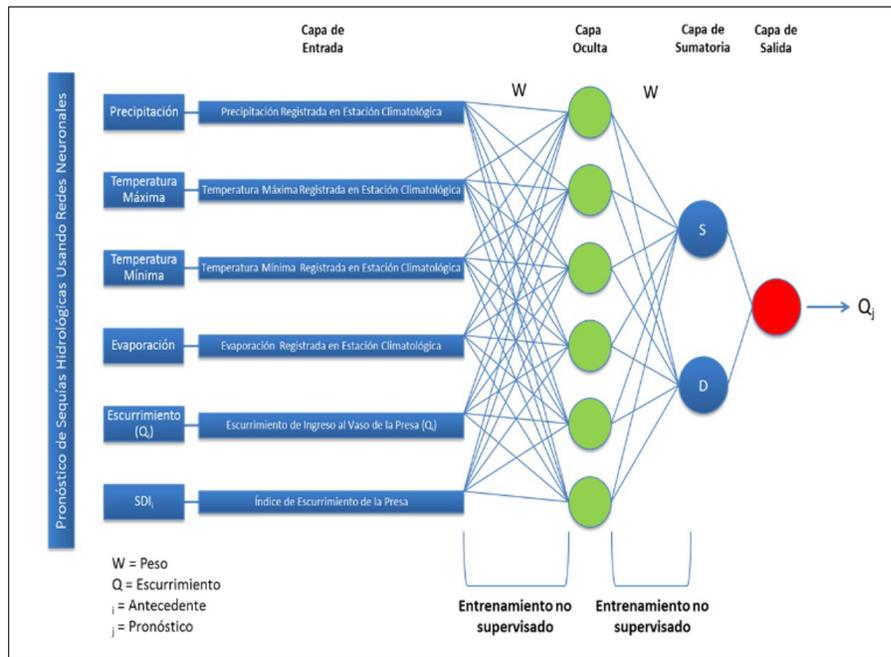


Figura 3.- Red Neuronal Multivariada utilizada para el análisis de escenarios de sequías hidrológicas.

Analysis, entre otras; considerando diferentes funciones de transferencia (TanhAxon, SigmoidAxon, Linear TanhAxon) y Linearing Rule (Step, Momentum, Conjugate Gradiente), considerando diferentes

porcentajes de datos para su validación y entrenamiento; aplicando para ello el programa de Redes Neuronales *NeuroSolutions* (www.neurosolutions.com).

Los resultados obtenidos de aplicar redes neuronales a índices de sequía se presentan en gráficos de coordenadas para series de cada localidad y en mapas para la presentación de resultados regionales sobre los pronósticos a distintos plazos. Debe destacarse que, a medida que aumenta el plazo del pronóstico, también aumenta el error cuadrático medio del pronóstico. Así, un pronóstico a seis meses es menos preciso que uno a tres meses y éste, a su vez, menos preciso que uno a un mes (Ravelo, 2008).

La fase de validación consistió en aplicar la red entrenada a otro conjunto de datos independientes para los cuales se conocen los resultados a fin de comprobar la eficiencia de la misma.

Resultados

Se realizó el análisis y la determinación de escenarios de sequía en el período 1978-2016, que

incluye la gran sequía del 2011-2012, evento ciclónico Manuel en 2013 y la presencia del Monzón de América del Norte (Monzón Mexicano) en el período 2015-2016. El trabajo consistió en el monitoreo temporal y espacial de sequías meteorológicas, utilizando los índices puntuales SPI y PDSI y satelital NDVI.

El pronóstico de las sequías meteorológicas fue realizado con redes neuronales, teniendo como datos de entrada los índices de sequía históricos y los resultados validados estadísticamente mediante el coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de concordancia de Willmott (d), Error Absoluto Medio (MAE), Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Porcentaje del Error Cuadrático Medio (% de RMSE). La cartografía de los índices fue automatizada mediante la aplicación de software a partir de los resultados puntuales del pronóstico de los índices por localidad. Se presenta como ejemplo el caso de la estación Varejonal (Tabla 3) (Figura 4).

Tabla 3: Pronóstico del SPI3 a 1, 2 y 3 meses de la estación Varejonal, año 2015.

Estación El Varejonal					
Año	Mes	Índice SPI 3			
2015	Agosto	Mes	Septiembre	Octubre	Noviembre
		Pronóstico	1,09	0,93	0,47
		Observado	1,33	1,11	0,67
	Septiembre	Mes	Octubre	Noviembre	Diciembre
		Pronóstico	1,00	0,42	0,18
		Observado	1,11	0,67	0,75
	Octubre	Mes	Noviembre	Diciembre	Enero
		Pronóstico	0,51	0,18	0,19
		Observado	0,67	0,75	0,67
	Noviembre	Mes	Diciembre	Enero	Febrero
		Pronóstico	0,36	0,41	0,55
		Observado	0,75	0,67	0,68
Diciembre	Mes	Enero	Febrero	Marzo	
	Pronóstico	0,67	0,68	0,46	
	Observado	0,38	0,37	-0,34	

Como ejemplo, en la Figura 5 se ilustra el pronóstico espacial de la sequía meteorológica mediante el índice PDSI y el comportamiento real de las condiciones hídricas en el OCPN para los meses de estiaje marzo, abril y mayo de 2015. Los pronósticos se elaboraron en el mes de febrero y se validaron en los meses de marzo, abril y mayo.

Los resultados del pronóstico de escurrimientos mensuales de ingreso a presas, mediante el modelo de red neuronal Perceptron Multilayer de dos capas, para el período 2011-2015, fueron comparados con los valores pronosticados mediante una función de distribución de probabilidad con ocurrencia al 98%, utilizada para el diseño del Plan de Riego del Distrito Riego #010 del OCPN y con los valores observados en los meses de dichos períodos. En ambos casos, las redes neuronales dieron un pronóstico más acertado a los valores observados que los estimados por las Función de Distribución de Probabilidad al 98%.

A continuación, se presentan los pasos de la metodología

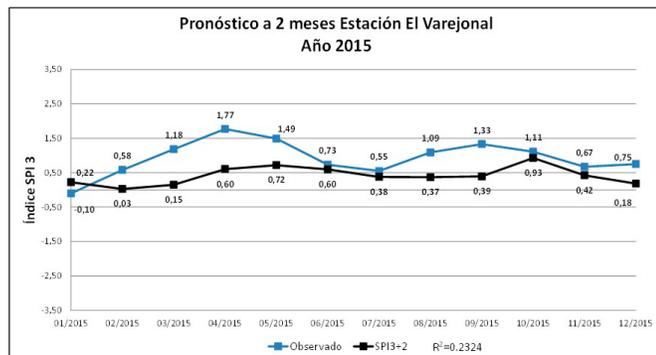
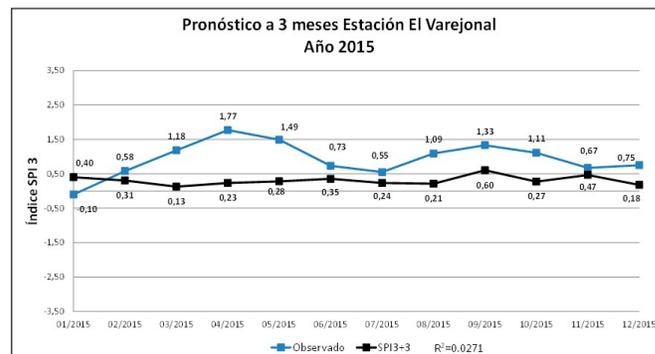
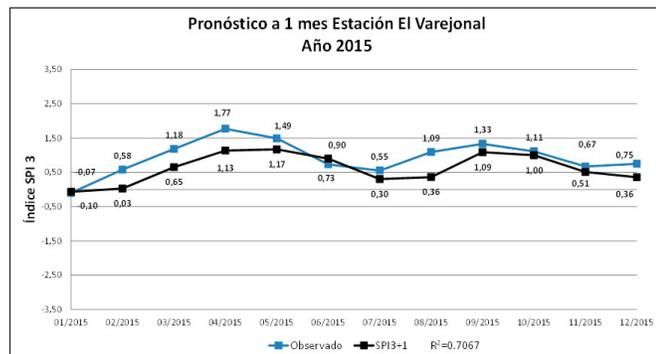


Figura 4: Pronóstico de SPI3 a 1, 2 y 3 meses en la estación El Varejonal para el año 2015.

para el Análisis Multivariado Temporal y Pronóstico de Sequías Hidrológicas, Mediante el Uso de Redes Neuronales, Variables Meteorológicas, Volúmenes de Escurrimiento e Índices de Sequía Hidrológica (SDI).

1. Seleccionar la cuenca de estudio
2. Determinar la estación hidrométrica con registros históricos de escurrimientos y las estaciones climatológicas con influencia en la cuenca.

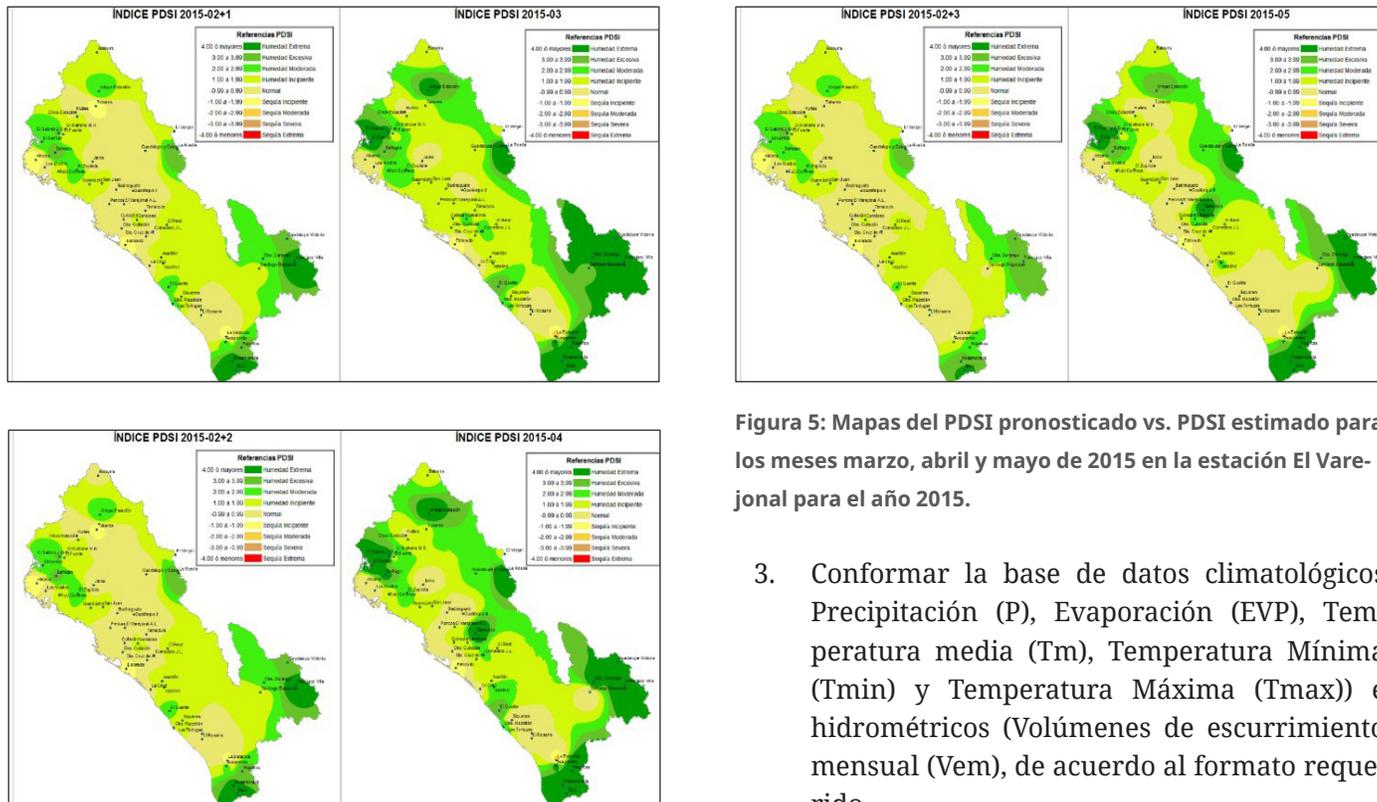


Figura 5: Mapas del PDSI pronosticado vs. PDSI estimado para los meses marzo, abril y mayo de 2015 en la estación El Varejonal para el año 2015.

- Conformar la base de datos climatológicos Precipitación (P), Evaporación (EVP), Temperatura media (Tm), Temperatura Mínima (Tmin) y Temperatura Máxima (Tmax) e hidrométricos (Volúmenes de escurrimiento mensual (Vem), de acuerdo al formato requerido.
- Estimar el índice de Esguimiento de Sequías (SDI), usando los volúmenes de escurrimiento

- mensual de la estación hidrométrica o presa seleccionada.
5. Incluir en la base de datos el índice SDI, estimado en el punto anterior.
6. Convertir los registros de la base de datos del formato Excel a formato .CSV
7. Aplicar la función SENOS de Excel a los meses del año.
8. Aplicar la función Aleatoria de Excel a la base de datos.
9. Seleccionar la Red Neuronal para el pronóstico de los volúmenes de escurrimiento mensual (Vem).
10. Ubicar el archivo de datos en formato .CSV (puntos 6, 7 y 8).
11. Construir la Red de Neuronas seleccionando las variables de entrada: P, EVP, Tm, Tmin, Tmax y SDI, y las de salida: Q.
12. Efectuar la validación cruzada y prueba de datos.
13. Seleccionar el número de capas ocultas.
14. Seleccionar la función de Transferencia.
15. Seleccionar el “*Learning Rule*”.
16. Seleccionar el número máximo de iteraciones (Maximum Epochs).
17. Construir la configuración de prueba.
18. Construir la Red Neuronal.
19. Seleccionar los archivos de datos de ingreso y la variable de salida deseada.
20. Llevar a cabo la Validación (Testing), exportando los resultados a un archivo de datos .txt.
21. Graficar los resultados de la Validación.
22. Estimar los errores de la Validación, por diferentes métodos.
23. Hacer el Pronóstico (Producción).
24. Exportar los resultados de la Producción a un archivo .txt)
25. Graficar los resultados del Pronóstico (Producción)
26. Estimar los errores producidos por el Pronóstico, mediante el Programa Errores.xlsx.
27. Salvar y guardar la neurona con el mejor ajuste y con error aceptable.
28. Repetir el procedimiento con otras redes neuronales, de diferente tipo y estructura.

29. Comparar mediante métodos estadísticos el mejor ajuste o la mejor red neuronal que pueda representar el pronóstico de los escurrimientos futuros conforme se avance en el tiempo.
30. Aplicar la mejor red neuronal seleccionada para el pronóstico de los volúmenes de escurrimiento que se registrarán en las estaciones hidrométricas o ingresarán a los embalses de las presas en los siguientes tres meses, mes a mes.
31. Estimar los índices de Escurrimiento de sequía (SDI), asociados a los volúmenes de escurrimiento pronosticados para los siguientes tres meses.
32. Clasificar la fase de la sequía hidrológica esperada para los tres meses siguientes, con base en los índices SDI estimados en el punto anterior.
33. Estimar el índice de estado de las presas (I_e), para los siguientes tres meses; considerando los volúmenes de ingreso a las presas pronosticados en el punto 30, los volúmenes de la

demanda futura de los siguientes tres meses y el volumen de almacenamiento esperado al primer día de cada uno de los meses para los que se estimara el índice de estado.

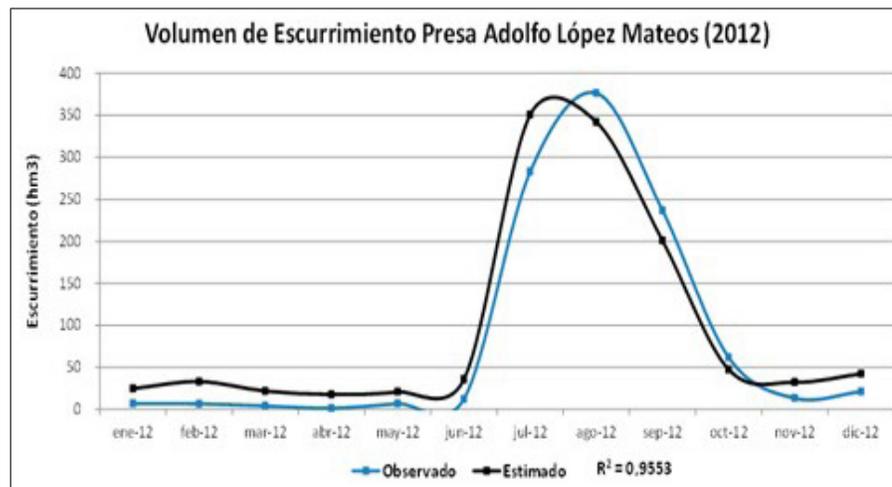
34. Replicar esta metodología a otras cuencas y a otros casos específicos del OCPN y del país.

Esta metodología es aplicable cuando se conocen las condiciones climáticas a presentarse en los meses siguientes. Si bien es cierto que se puede apoyar en los métodos de pronóstico meteorológicos, éstos aún presentan un alto grado de incertidumbre, lo que haría al pronóstico de sequías hidrológicas poco confiable.

Como ejemplo de la aplicación de esta metodología, en la Figura 6 se ilustra el pronóstico de sequías hidrológicas usando redes neuronales Multivariada Perceptrón Multilayer de dos capas, presa El Varejonal, año 2013.

Conclusiones

El uso de la Inteligencia Artificial a través de las redes neuronales multivariadas utilizando como variables a los volúmenes de escurrimiento men-



Para mejorar el ajuste entre valores observados y pronosticados es conveniente considerar la inclusión de otras variables que afectan el esguerrimiento, tales como la cobertura vegetal, la topografía del terreno, el tipo y el uso de suelo. Con este trabajo se contribuye a la gestión integral de cuencas para la prevención, mitigación, adaptación y respuesta ante la sequía. 💧

Figura 6- Pronóstico de sequías hidrológicas usando redes neuronales Multivariada Perceptrón Multilayer de dos capas, presa El Varejonal, año 2013.

sual y la precipitación, temperaturas y evaporación de las diferentes estaciones climatológicas generan mejores pronósticos que los producidos por las redes neuronales univariadas para el caso de estudio.

Referencias

- Bocco M., Ovando G, 2013. Notas sobre redes neuronales artificiales. CREAN, UNC. 83 páginas.
- Basogain, X. 2009. Curso Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones. Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao, EHU.
- CREAN [Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales] (2016). Monitoreo de Sequías. <http://www.crean.unc.edu.ar/secciones/monitoreo>.
- Dawson C. W. y Wilby R. L., 2001. Hydrological modelling using artificial neural networks. *Progress in Physical Geography*, 25, 1, pp. 80-108.
- Douriet, C.J.C., Ravelo, A.C., Ramirez, O.A.I., Torrecillas N.C.E. y Garcia, C.M. (2017). "Determinación de escenarios por sequía en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, México". RADA, 2018, Vol. IX, pags. 57-73, ISSN 2545-8418, Argentina.
- Douriet, C.J.C. (2017). Determinación de escenarios por sequía mediante análisis Multivariado Temporal usando Redes Neuronales en México. *Tesis Doctoral*. Universidad Nacional del Córdoba, Argentina.
- Forbes. (20 de noviembre de 2020). How AI Is Helping To Combat Drought And Save Water? (¿Cómo la IA está ayudando a combatir la sequía y ahorrar agua?). <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2020/11/20/how-ai-is-helping-to-combat-drought-and-save-water/>
- Hayes, M.J., M. Svoboda D., Wilhite, D.A. y Vanyarkho, O. (1999). Monitoring the drought 1996 using the standardized precipitation Index. *Bulletin of American Meteorological Society*, 80 (3), 429-438.
- McKee, T. B., Doesken, N.J. y Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society*. Boston, Massachusetts. 179-184.
- Nalbantis, I. (2008). Evaluation of a Hydrological Drought Index. *European Water*, 23/24, 67-77.
- Ortega, (2016). Estimación de la Vulnerabilidad a la Sequía. Curso de preparación para estimar la vulnerabilidad a la sequía en municipios, cuencas y Consejos de Cuenca en la República Mexicana. Documentos internos de IMTA-CONAGUA. México.

Palmer, W.C. (1965). Meteorological drought. Documento de Investigación N° 45. Oficina Meteorológica del Departamento de Comercio. Washington, D.C.

Ravelo A.C., Sanz Ramos, R. y Douriet C.J.C. (2014). Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte. *AgriScientia*, 31 (1).

Ravelo A.C. (2012). Monitoreo, Pronóstico y Evaluación de Riesgo por Sequía Hidrológica en la Región Hidrológica 10 del Organismo de Cuenca Pacífico Norte. OMM-CONAGUA. México.

Ravelo A.C. (2009). Desarrollo de un Sistema Operativo para el Monitoreo, Evaluación y Pronóstico de Sequías (SOS) en el ámbito del Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN/CNA), Área de estudio: Cuenca del río Culiacán. OMM-CONAGUA. México.

Ravelo, A.C. (2008). Monitoreo, evaluación y pronóstico de sequías en el Organismo de Cuenca Pacífico Norte. Proyecto PREMIA CONAGUA. Informe Final OMM. México.

Velasco, I. (2002). Plan de preparación para afrontar sequías en un Distrito de Riego. *Tesis Doctoral*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind” (Informe de Desarrollo Mundial del Agua 2019: No Dejar a Nadie Atrás). Puedes encontrar más información en el sitio web de las Naciones Unidas sobre el informe: <https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2019/>



Te invitamos a participar
en nuestra publicación digital

Impluvium

Con el tema:

EXPERIENCIAS EN LA RESTAURACIÓN Y RECUPERACIÓN DE CUERPOS DE AGUA

Recepción de trabajos:
**DEL 10 DE ABRIL
AL 30 DE JUNIO DEL 2023**

Consulta los detalles en:
www.agua.unam.mx/impluvium.html

Los cuerpos de agua brindan una gran cantidad de bienes y servicios ambientales, sin embargo, han experimentado importantes alteraciones ecológicas, hidrológicas y geomorfológicas como consecuencia de los procesos de urbanización, el desarrollo de infraestructura, el cambio de uso de suelo y el incremento en los tipos y concentraciones de contaminantes, entre otros fenómenos.

Para Zamora, Mazari y Almeida (2017), durante el siglo XX los cuerpos de agua, particularmente los ríos, fueron gestionados bajo un paradigma sanitarista, que los incorporó al sistema de drenaje y abonó a su degradación, al tiempo que contribuyó a la desconexión de las personas con el agua. No obstante, en décadas recientes han proliferado en todo el mundo las experiencias en la restauración y recuperación de cuerpos de agua.

La Sociedad de Restauración Ecológica define a esta acción como el proceso de recuperar y manejar la integridad ecológica de un sistema, considerando un rango crítico de variabilidad en la biodiversidad, procesos ecológicos y estructuras en un contexto regional e histórico y adecuado a ciertas prácticas culturales. Es decir, la manipulación de un sistema perturbado para regresarlo a su estado original, a uno similar o, incluso, a uno mejor.

En el caso específico de los ríos, supone la modificación a los canales ribereños, zonas riparias, planicies de inundación, descargas de sedimentos y contaminantes, entre otras acciones. Bajo estos principios, este número de Impluvium busca conocer los retos y oportunidades enfrentados por los actores que ejecutan proyectos de restauración y recuperación de cuerpos de agua en diferentes escalas y contextos.

Se invita a presentar aportaciones que consideren una perspectiva interdisciplinaria, destacando, por ejemplo, aspectos económicos, de participación social, intervenciones en el régimen hídrico, concentraciones de químicos, estructura de la red trófica, la gestión de sedimentos, manejo de especies, entre otras.



Te invitamos a participar
en nuestra publicación digital

Impluvium

Con el tema:

CONVERGENCIA TECNOLÓGICA PARA LA GESTIÓN SUSTENTABLE DEL AGUA

Recepción de trabajos:
**DEL 3 DE JULIO
AL 29 DE SEPTIEMBRE DEL 2023**

Consulta los detalles en:
www.agua.unam.mx/impluvium.html

De acuerdo con el fundador del Foro Económico Mundial, la llamada Cuarta Revolución Industrial genera un mundo en el que los sistemas de fabricación virtuales y físicos cooperan entre sí de manera flexible y a nivel global. Esta nueva etapa no solo consiste en sistemas inteligentes y conectados, sino que se trata de la convergencia de tecnologías y su interacción a través de los espacios físicos, digitales y biológicos.

El sector hídrico tiene grandes oportunidades para incorporar innovaciones tecnológicas y lograr así una gestión sustentable de los recursos hídricos. En la actualidad, existe una amplia disponibilidad y asequibilidad de tecnologías, lo que permite incorporar estas herramientas digitales a lo largo del todo el ciclo hidrológico. Estos cambios tecnológicos también transforman a las diversas organizaciones que forman parte del sistema hídrico, incluyendo a los múltiples usuarios del agua.

La convergencia tecnológica en el sector hídrico tiene el potencial de integrar sistemas más eficientes y resilientes, reducir los costos de construcción, operación y mantenimiento de las infraestructuras verdes y grises, entre muchas otras aplicaciones. Las soluciones tecnológicas inteligentes deben permitir la integración, en tiempo real, de datos provenientes de múltiples actores y servir para mejorar la toma de decisiones, tanto a nivel personal como de política pública.

Sin lugar a dudas, la convergencia tecnológica es una herramienta indispensable para alcanzar la seguridad hídrica, sin embargo, se requiere profundizar en su estudio y compartir los casos de éxito, por ello, este número de Impluvium busca conocer las principales aplicaciones de las innovaciones digitales en el sector hídrico y analizar sus oportunidades y desafíos económicos, tecnológicos, sociales e incluso éticos.

Entre los temas a abordar se sugieren:

- Sensores, monitoreo y pronóstico. Micro sensores, teledetección, sistemas de información geográfica, drones, medidores en tiempo real
- Inteligencia artificial. Aprendizaje automático, reconocimiento de patrones en los datos, redes de comunicación, bots de chat
- Realidad aumentada, virtual y digital. Gemelos digitales fusionados con SIG, sensores aplicados en realidad virtual y aumentada
- Aplicaciones de blockchain. Transacciones directas y seguras entre proveedores de recursos, gobierno, empresas de servicios públicos y ciudadanía



Te invitamos a participar
en nuestra publicación digital

Impluvium

Con el tema:
**PRÁCTICAS
SOCIOCULTURALES
EN TORNO A LA
GESTIÓN DEL AGUA**

Recepción de trabajos:
**DEL 2 DE OCTUBRE
AL 15 DE DICIEMBRE DEL 2023**

Consulta los detalles en:
www.agua.unam.mx/impluvium.html

Cada cultura establece significados particulares alrededor del agua. Las percepciones de las personas sobre el uso y aprovechamiento los recursos hídricos están mediadas por esa relación sociocultural. Para comprender y analizar las prácticas en torno a la gestión del agua es necesario hacer una lectura del contexto en el que se desarrollan. Este entendimiento permite explicar las instituciones, acciones colectivas y mecanismos sociales detrás de las prácticas desarrolladas por los miembros de una sociedad en un espacio geográfico y temporal determinado.

En términos generales, una práctica sociocultural se define como las acciones o intervenciones que consideran los conocimientos, experiencias, habilidades y capacidades inscritas en un sistema cultural. Todo grupo social comparte un conjunto de rasgos distintivos, materiales, intelectuales, simbólicos, emocionales y espirituales que se manifiestan en sus modos de vida, tradiciones, valores, creencias y otros mecanismos para regular la vida social. Estas características pueden ser incompatibles o insustituibles entre una y otra cultura, o compartidos y apreciados entre sociedades diferentes. De acuerdo con Fish et al. (2016), las prácticas sociales son un reflejo y, al mismo tiempo, crean la cultura, a través de una amplia gama de manifestaciones: mitos, ritos, narrativas y otras expresiones materiales o intangibles.

La dimensión sociocultural se ha integrado en marcos de análisis, como los servicios ecosistémicos, o en los esquemas de gobernanza de los recursos hídricos, con énfasis en aspectos como la apropiación del territorio, la identidad y pertenencia cultural, las cosmovisiones originarias, entre otros.

Reconocer los sentidos y valores alrededor de las prácticas sociales para la gestión del agua puede contribuir a la construcción de consensos, al manejo de conflictos, a la identificación de buenas prácticas o procesos de apropiación de las tecnologías, al reconocimiento e integración de los conocimientos locales, indígenas o tradicionales, entre otros beneficios.

- Expresiones simbólicas en torno al agua (mitos, ritos y tradiciones)
- Interacciones entre los valores y las prácticas de uso y consumo de agua
- Diversidad cultural y sistemas de gestión del agua
- Métodos para la evaluación y análisis de los valores culturales relacionados al agua
- Discrepancias y construcción de consensos respecto a los modelos de gestión del agua

Lineamientos

1. La contribución debe ser un texto de **corte académico**, por lo que no debe personalizarse.
2. Los trabajos deben contener: título, nombre del autor o autores y su institución de adscripción, resúmen (de hasta 150 palabras), introducción, desarrollo, conclusiones y bibliografía consultada.
3. Las contribuciones deberán entregarse en formato de procesador de textos Microsoft Word, con letra Arial de 12 puntos e interlineado doble.
4. Los textos no deberán exceder **1,700 palabras**, incluyendo la bibliografía.
5. Las imágenes que deseen utilizarse en el texto se entregarán en archivo independiente en formato jpg a 150 dpi. En el documento de Word se referirán de la siguiente manera: Véase Figura 1.
6. Se utilizará el sistema de citas y referencias bibliográficas Harvard-APA. Este estilo presenta las citas dentro del texto del trabajo, utilizando el apellido del autor, la fecha de publicación y la página, por lo que no se requieren notas al pie de página. Ejemplo: (González Villarreal, 2013, p. 25).
7. Al final del trabajo la bibliografía se agrupará en el apartado "Bibliografía" y se colocará de la siguiente manera: autor, año de publicación (entre paréntesis), título, editorial y lugar de publicación. Ejemplo: González Villarreal, F. y Arriaga Medina, J. (2015). Expresiones de la inseguridad hídrica. Revista Ciudades, No. 105, Puebla, México.
8. Los editores realizarán una corrección de estilo y consultarán con los autores cualquier modificación sobre el contenido de la contribución.
9. El artículo debe enviarse al correo electrónico contacto@agua.unam.mx con el asunto **Artículo Impluvium: (tema)**.



Impluvium

Publicación digital de la Red del Agua UNAM

Número 22, Enero - Marzo 2023

www.agua.unam.mx