

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

DOI: 10.24850/j-tyca-2022-02-01

Artículos

Marco conceptual y metodológico del riesgo por sequía y sus componentes: amenaza, exposición y vulnerabilidad

The conceptual and methodological framework of drought risk and its components: Hazard, exposure and vulnerability

Heidy Viviana Castellano-Bahena¹, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1387-516X

David Ortega-Gaucin², ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5336-7442

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, heidyviv78@gmail.com

²Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, dortega@tlaloc.imta.mx

Autor para correspondencia: David Ortega-Gaucin, dortega@tlaloc.imta.mx



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Resumen

La reducción del riesgo de seguía y sus impactos directos e indirectos ha cobrado relevancia mundial durante las últimas décadas. En este trabajo se presenta una revisión de las herramientas conceptuales y metodológicas básicas para analizar el riesgo por seguía en un sistema determinado. Se describen los componentes fundamentales del riesgo, concebido principalmente como una función de la amenaza (o peligro específico, que en este caso es el fenómeno de la seguía); la exposición (personas, propiedades, medios de vida y sistemas que están sujetos a daños y pérdidas potenciales debido al peligro), y la vulnerabilidad (representada por las condiciones socioeconómicas y ambientales del sistema que lo hacen susceptible de sufrir daños). Se explican los conceptos y definiciones asociados con estos componentes, y se presentan los métodos y modelos matemáticos más usuales para calcularlos. Se concluye que, dada la gran diversidad de enfoques, conceptos y métodos para determinar el riesgo por seguía, queda a criterio del investigador o evaluador la selección del más apropiado en función del enfoque adoptado, la información disponible, y el contexto u objetivo de la investigación.

Palabras clave: gestión del riesgo, fenómenos extremos, sequía, cambio climático, vulnerabilidad, capacidad de adaptación.

Abstract

Drought risk reduction and its direct and indirect impacts have gained worldwide relevance during the last decades. This paper presents a review



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-

sa/4.0/)

of the basic conceptual and methodological tools to analyze the drought risk in a given system. The fundamental components of risk are described, conceived primarily as a function of hazard (or specific danger, which in this case is the drought phenomenon); exposure (people, property, livelihoods, and systems that are subject to potential damage and loss due to hazard), and vulnerability (represented by the socio-economic and environmental conditions of the system that make it susceptible to suffering damage). The concepts and definitions associated with these components are explained and the most usual mathematical methods and models for calculating them are presented. It is concluded that, given the great diversity of approaches, concepts, and methods to determine drought risk, it is at the discretion of the researcher or evaluator the selection of the most appropriate depending on the approach adopted, the information available, and the objective or investigation context.

Keywords: Risk management, extreme phenomena, drought, climate change, vulnerability, adaptive capacity.

Recibido: 25/02/2020

Aceptado: 13/02/2021

Introducción



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

En décadas recientes, los desastres provocados por fenómenos naturales han aumentado en el mundo como resultado principalmente del incremento en la vulnerabilidad de la población, y sólo en parte por cambios en las características del peligro mismo (IPCC, 2012). La mayor exposición de la población a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos extremos ha resultado en mayor número de desastres. Por ello, el impacto de los desastres en las actividades humanas ha sido un tema tratado en los últimos años en un amplio número de publicaciones, las cuales han sido desarrolladas desde diversas disciplinas que han conceptualizado las componentes del riesgo en formas diferentes, aunque en la mayoría de los casos de una manera similar (p. ej., UNDRO, 1979; Cardona, 1985; Cardona, 2001; Schneiderbauer & Ehrlich, 2004; Davis, 2004; Jordaan, 2006; Burg, 2008). En términos generales, la mayoría de las propuestas conceptuales coinciden en señalar que el riesgo ante los desastres puede reducirse si se entiende como el resultado de relacionar la amenaza o peligro, es decir, la probabilidad de ocurrencia de un evento específico, y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, o factor interno de selectividad de la severidad de los efectos sobre dichos elementos (Figura 1a). Algunos trabajos relacionados con esta concepción del riesgo son, por ejemplo, los realizados por Yen (1971); Cardona (1985); Cardona (1993); Blaikie, Cannon, Davis y Wisner (1994); Wisner, Blaikie, Cannon y Davis (2003), y Tsakiris (2007). Esta concepción del riesgo ha sufrido algunos cambios, pues, por ejemplo, en el quinto informe de evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014) se determinó que los riesgos del cambio climático provienen



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

del solapamiento entre la vulnerabilidad (falta de preparación), la exposición (personas o bienes en situación de riesgo), y los peligros (que desencadenan fenómenos o tendencias climáticas), como se muestra en la Figura 1b.

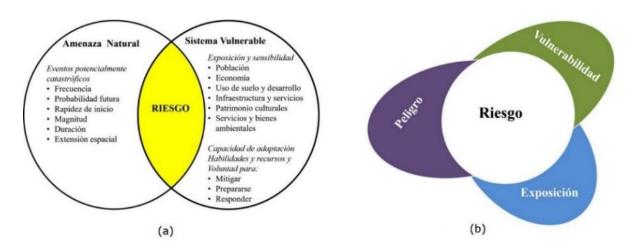


Figura 1. a) Interacción del riesgo con la amenaza y la vulnerabilidad; b) interacción del riesgo con la amenaza (peligro), la vulnerabilidad y la exposición. Fuente: adaptada Wood (2011) e IPCC (2014).

Cada uno de los componentes mencionados puede ser objeto de medidas selectivas que contribuyan a reducir los riesgos (Ortega-Gaucin, López, & Arreguín, 2016). Existen algunos trabajos que describen conceptual y metodológicamente la interacción de los componentes del riesgo (sin centrarse en el análisis de una amenaza o peligro específico), como son los realizados por Cardona (1993), Blaikie *et al.* (1994), Hoddinott y Quisumbing (2003), BID (2003), Schneiderbauer y Ehrlich (2004), Jordaan (2006), Tsakiris



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

(2007), Birkmann (2007), y Welle y Birkmann (2015), entre otros. Sin embargo, hablando específicamente del riesgo por sequía, encontramos que la revisión de modelos matemáticos para calcularlo es limitada, pues por lo general las investigaciones se centran en el análisis de sólo un componente del riesgo, ya sea la amenaza la vulnerabilidad, sin abordar teórica ni metodológicamente la interacción entre ambas variables. Algunos de estos trabajos son los realizados por Gibbs, Maher y John (1967); Bergaoui y Alouini (2001); Bhuiyan (2004); Boken (2005); Narasimhan y Srinivasan (2005); Velasco, Ochoa y Gutiérrez (2005); Chandrasekar, Sai, Roy, Jayaraman y Krishnamoorthy (2009), y Tsakiris et al. (2013). En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo hacer una revisión y describir conceptual y metodológicamente las maneras más usuales para evaluar la amenaza, exposición, vulnerabilidad y riesgo de seguía. Así, la aportación del trabajo consiste en proporcionar, de manera concisa, un panorama amplio que sirva de base para la evaluación del riesgo ante este peligro natural. En los siguientes apartados se describen a detalle cada uno de los componentes del riesgo: se inicia por la amenaza, donde se presentan los principales conceptos relacionados con el fenómeno de la seguía, como son los tipos de seguía identificados en la literatura, y los métodos más comunes caracterizar y evaluar la severidad del fenómeno; para posteriormente se analiza el tema de la exposición, en el cual se describe el concepto, sus dimensiones fundamentales y los indicadores utilizados para medirla; luego se detalla la



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

vulnerabilidad, incluyendo las definiciones más usuales, sus componentes, características y métodos para calcularla; después se puntualizan las diferentes definiciones de riesgo y los modelos matemáticos utilizan determinarlo de aue se para manera cuantitativa; por último se presentan algunas consideraciones sobre los conceptos analizados y las conclusiones derivadas de investigación.

Amenaza o peligro hidrometeorológico

La amenaza o peligro hidrometeorológico es un proceso o fenómeno de origen atmosférico, hidrológico u oceanográfico que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastomos sociales y económicos, o daños ambientales (UNISDR, 2009). Por lo general, la amenaza se estima con información meteorológica o climática histórica, y se representa por la probabilidad de que ocurra un fenómeno meteorológico o climático particular (p. ej., ciclón tropical, lluvia torrencial, sequía, etc.). En este caso, el peligro que nos interesa es el fenómeno de la sequía entendida en su sentido más amplio, es decir, aquella disminución severa y prolongada de la lluvia que es capaz de



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

provocar graves desequilibrios hidrológicos, y afectar las actividades humanas y los ecosistemas (OMM & GWP, 2006). Así, el peligro por sequía se refiere a la probabilidad de que ocurra un evento de sequía en un espacio y tiempo determinados con suficiente intensidad como para producir daños. Los valores del peligro varían de una región a otra y dependen de las características específicas del fenómeno estudiado (Magaña, 2013). En los siguientes apartados se describen las definiciones y tipos de sequía, sus parámetros y los principales métodos para determinar sus características (duración, magnitud, severidad, extensión espacial, etc.).

Definición y tipos de sequía

La sequía se inicia en su mayoría por precipitación deficiente y es considerada como un fenómeno natural relacionado con la variabilidad climática en una región (Tsakiris *et al.*, 2013). Hay muchas definiciones de sequía, algunas de las cuales están adaptadas para sectores específicos de la economía, regiones climáticas y condiciones que afectan a un área en específico (Wilhite & Glantz, 1985; Correia, Santos, & Rodrigues, 1991; Tate & Gustard, 2000), pero ninguna es universalmente aceptada debido a que se trata de un fenómeno relativo cuyas características varían de un lugar a otro. Hace 36 años, Wilhite y Glantz



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

(1985) detectaron más de 150 definiciones de sequía publicadas en la literatura, y las clasificaron en cuatro grupos según la disciplina científica desde la que es analizado el fenómeno y sus impactos: seguía agrícola, meteorológica, sequía sequía hidrológica seguía socioeconómica. Esta clasificación sigue vigente y es ampliamente utilizada en artículos científicos especializados en el tema (p. ej., Bootsma, Boisvert, & Baier, 1996; Barakat & Handoufe, 1998; Wilhite, 2000; Valiente, 2001; Bergaoui & Alouini, 2001; Boken, 2005; Mishra & Singh, 2010). Los primeros tres enfoques o tipos de seguía (meteorológica, agrícola e hidrológica) tratan formas de medir la seguía como un fenómeno físico; el último enfoque (seguía socioeconómica) aborda la seguía en términos de oferta y demanda, rastreando los efectos del déficit de agua a medida que se propaga a través de los sistemas socioeconómicos. La seguía meteorológica se define por lo general en función del grado de disminución de la lluvia en comparación con alguna cantidad "normal" o promedio, y la duración del periodo seco. La seguía agrícola vincula varias características de la seguía meteorológica (o hidrológica) con los impactos agrícolas, centrándose en la escasez de precipitaciones, las diferencias entre la evapotranspiración real y potencial, y los déficits hídricos del suelo. La seguía hidrológica se asocia con los efectos de los periodos de precipitación deficitarios en el suministro de agua superficial o subterránea. La seguía socioeconómica difiere de los tipos de seguía antes mencionados, porque su ocurrencia depende de los procesos de oferta y demanda de agua en un tiempo y espacio determinados. En la Figura 2 se muestra la secuencia de evolución de los diversos tipos de seguía descritos.

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

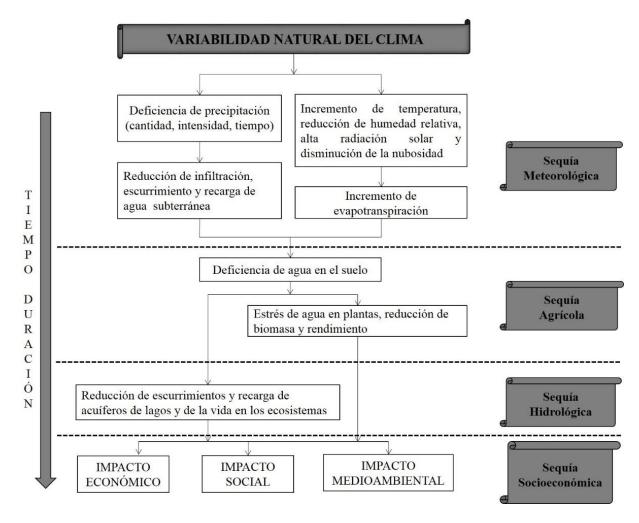


Figura 2. Secuencia de evolución de los diversos tipos de sequía.

Fuente: modificada de NDMC (1995).

Parámetros de la sequía



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Las definiciones operativas de los diversos tipos de sequía necesitan ser trasladadas a un formato numérico (parámetros) para poder precisar las características de los eventos secos (Valiente, 2001). Desde los puntos de vista meteorológico e hidrológico, los parámetros básicos de la seguía son (Burton, Kates, & White, 1978; Dracup, Lee, & Paulson, 1980): la magnitud, que es el déficit medio de precipitación o caudal durante el periodo de duración del evento seco; la severidad, que es el déficit acumulado de caudal o precipitación para la duración del periodo seco; la duración, que es el tiempo (número total de días, meses o años consecutivos) durante el cual la precipitación o el caudal totales registrados son inferiores a la precipitación, o el caudal medio de ese mismo periodo. Los parámetros anteriores están en función, entre otros factores, del llamado nivel de truncamiento (X_o) , referencia a partir de la cual los valores menores representan una deficiencia y probablemente una seguía, medida en términos de la cantidad de lluvia o escurrimiento (Velasco et al., 2005), como se muestra en la Figura 3.



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

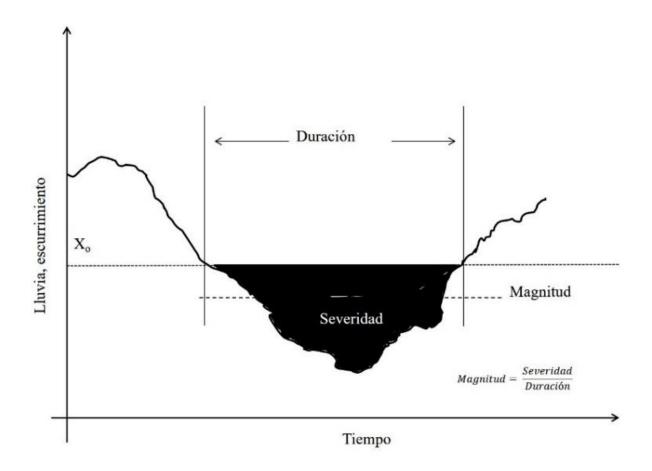


Figura 3. Parámetros básicos para caracterizar la sequía desde las perspectivas meteorológica e hidrológica. Fuente: adaptada de Velasco *et al.* (2005).

Cuando se analiza la sequía desde los puntos de vista agrícola y socioeconómico es difícil determinar sus características sólo a partir de los parámetros descritos anteriormente. Por lo anterior, para cada tipo de sequía se han creado y utilizado una gran diversidad de métodos y modelos de evaluación basados en índices e indicadores, tal como se describe en el siguiente apartado.



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Métodos de evaluación de la sequía

Actualmente existe una amplia variedad de indicadores e índices para las caracterizar la seguía principalmente desde perspectivas meteorológica, agrícola e hidrológica, cada uno de los cuales tiene ventajas y desventajas que limitan o favorecen su aplicación en un ámbito determinado (Byun & Wilhite, 1999; Heim, 2002; Hayes, Svoboda, Wall, & Widhalm, 2011). Los *indicadores* son variables o parámetros utilizados para describir las condiciones de las seguías, por ejemplo: precipitación, temperatura, caudales fluviales, niveles de las aguas subterráneas y de los embalses, humedad del suelo, etcétera; y los *índices* suelen ser representaciones numéricas informatizadas de la gravedad de las seguías, determinadas mediante datos climáticos o hidrometeorológicos, entre los que se incluyen los indicadores mencionados, y tienen por objeto analizar el estado cualitativo de las seguías en el entorno en un periodo de tiempo determinado. De la misma forma que no hay una definición única de seguía, no existe ningún índice o indicador que pueda atribuirse y ser aplicado a todos los tipos de seguía, regímenes climáticos y sectores afectados por las seguías (OMM & GWP, 2016).

Desde el punto de vista meteorológico, los indicadores de la sequía están asociados con variables climatológicas como



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

precipitación, temperatura y evapotranspiración (Wilhite, 2005). Algunos de los índices más comunes para caracterizar la sequía meteorológica incluyen los deciles; el Índice de Anomalía Pluviométrica (RAI); el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI); el Índice de Seguía Efectiva (EDI); y el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI). Desde la perspectiva agrícola, los indicadores de la seguía consideran datos de humedad del suelo para detectar situaciones de seguía en los cultivos, y se enfocan en las anomalías de los valores de humedad del suelo con respecto a la estación y ubicación (Wanders, Van-Lanen, & Van-Loon, 2010), por ejemplo, el Índice de Severidad de Seguía de Palmer (PDSI); el Índice de Anomalía de la Humedad del Suelo (SMA); el Índice del Déficit de Evapotranspiración (ETDI); y el Índice del Déficit de Humedad del Suelo (SMDI). Asimismo, existen diversos índices basados en información satelital (teledetección) que identifican el estado de salud de la vegetación, y son útiles para identificar y caracterizar la seguía en la agricultura; algunos de estos índices incluyen el Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI) y el Índice de Salud de la Vegetación (VHI). Por último, desde el punto de vista hidrológico, los indicadores de seguía se refieren a variables del sistema hídrico, como los niveles de las aguas subterráneas, los caudales de los ríos y el almacenamiento de los embalses, principalmente (Wanders et al., 2010). Algunos índices derivados de estos indicadores incluyen el Índice de Seguía Hidrológica de Palmer (PHDI); el Índice de Abastecimiento de las Aguas Superficiales (SWSI); el Índice

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Normalizado del Nivel de Agua (SWI); el Índice Normalizado de los Caudales Fluviales (SSFI); el Índice de Sequía de los Caudales Fluviales (SDI), y el Índice Normalizado del Suministro de Embalses (SRSI). En la Tabla 1 se presentan los orígenes, aplicaciones, ventajas y desventajas de cada uno de los índices antes mencionados. Para una descripción más detallada de cada uno de ellos y recomendaciones específicas sobre su uso se sugiere revisar el *Manual de indicadores e índices de sequía* (OMM & GWP, 2016). En dicho manual se menciona, por ejemplo, que en 2009 la OMM recomendó a los países que utilizaran el SPI como principal índice para vigilar y dar seguimiento a las condiciones de sequía meteorológica.

Tabla 1. Características de los índices de sequía comúnmente utilizados.

Tipo de sequía	Índice	Variables de entrada*	Origen y aplicaciones	Ventajas	Desventajas
Meteorológica	Deciles	Р	•	método flexible y útil en situaciones de humedad	los efectos de la temperatura ni de otras



	Variables			
Índice	de	Origen y aplicaciones	Ventajas	Desventajas
	entrada*			
		frecuencia y distribución de		
		la lluvia		
RAI	Р	Desarrollado por Van-Rooy	Se puede analizar en	Requiere datos
		(1965). Utiliza valores	escalas mensuales,	completos en serie, y
		normalizados de la	estacionales y anuales	las variaciones
		precipitación sobre la base		interanuales deben ser
		del historial de la estación		pequeñas en
		de un lugar particular. La		comparación con las
		comparación con el periodo		variaciones temporales
		actual sirve para analizar el		
		producto desde el punto de		
		vista histórico		
SPI	Р	Creado por McKee, Doesken	Sólo requiere datos	No tiene en cuenta el
		y Kleist (1993) en la	mensuales de	componente de la
		Universidad del Estado de	precipitación, y se	temperatura, que es de
		Colorado (Estados Unidos).	puede calcular a	importancia para el
		Es un índice estandarizado	distintas escalas	balance hídrico general
		que se puede aplicar en	temporales, de tal	y el uso de agua en una
		todos los regímenes	manera que es factible	región. Este
		climáticos y para distintas	vigilar los efectos de la	inconveniente puede
		escalas temporales	sequía meteorológica	dificultar la
			en la agricultura y la	comparación de
			hidrología	episodios con valores
				del SPI similares, pero
				distintas condiciones
				térmicas
	RAI	Índice de entrada*	findice de entrada* frecuencia y distribución de la lluvia RAI P Desarrollado por Van-Rooy (1965). Utiliza valores normalizados de la precipitación sobre la base del historial de la estación de un lugar particular. La comparación con el periodo actual sirve para analizar el producto desde el punto de vista histórico SPI P Creado por McKee, Doesken y Kleist (1993) en la Universidad del Estado de Colorado (Estados Unidos). Es un índice estandarizado que se puede aplicar en todos los regímenes climáticos y para distintas	findice de entrada* frecuencia y distribución de la lluvia RAI P Desarrollado por Van-Rooy (1965). Utiliza valores normalizados de la precipitación sobre la base del historial de la estación de un lugar particular. La comparación con el periodo actual sirve para analizar el producto desde el punto de vista histórico SPI P Creado por McKee, Doesken y Kleist (1993) en la Universidad del Estado de Colorado (Estados Unidos). Es un índice estandarizado que se puede aplicar en todos los regímenes climáticos y para distintas escalas temporales esquía meteorológica en la agricultura y la



Tipo		Variables			
de	Índice	de	Origen y aplicaciones	Ventajas	Desventajas
sequía		entrada*			
	EDI	Р	Desarrollado por Byun &	Es aplicable a todos los	El uso de datos diarios
			Wilhite (1999) en el Centro	regímenes climáticos y	de precipitación puede
			Nacional de Mitigación de la	los productos son	dificultar el empleo del
			Sequía de Estados Unidos.	comparables porque	índice en contextos
			Sirve para detectar el inicio	están normalizados	operativos, pues quizá
			y final de periodos de déficit		no sea posible
			hídrico. Se puede calcular		actualizar a diario los
			en cualquier lugar del		datos de entrada
			mundo en que se disponga		
			de registros diarios de		
			precipitación		
	SPEI	P, T	Creado por Vicente-	Dado que utiliza datos	Es necesario disponer
			Serrano, Beguería y López-	de temperatura, es	de datos mensuales
			Moreno (2010) en el	idóneo para observar el	suficientes de
			Instituto Pirenaico de	efecto del cambio	precipitación y
			Ecología (España). Utiliza	climático en los	temperatura. Al
			como base el SPI, pero tiene	productos de los	tratarse de un índice
			en cuenta el efecto de la	modelos de acuerdo con	mensual, es posible que
			temperatura en las sequías.	distintos supuestos	no se detecten
			Se aplica en cualquier parte	futuros	inmediatamente las
			del mundo donde se tengan		situaciones de sequía
			registros de series		que se desarrollan con
			completas de datos		rapidez
			mensuales de precipitación		
			y temperatura		
los	PDSI	P, T, CAD	Desarrollado por Palmer	Es bastante fiable para	La necesidad de
Agrícol a			(1968) en la Oficina	detectar sequías gracias	disponer de datos



Tipo de	Índice	Variables de	Origen y aplicaciones	Ventajas	Desventajas
sequía		entrada*	Meteorológica de Estados Unidos para evaluar las sequías que afectan a la agricultura en las regiones productoras de cultivos de ese país. Ha sido aplicado y es muy popular en distintas partes del mundo, pues durante muchos años fue el único índice operativo de sequía	del suelo y de una metodología del balance hídrico total	completos en serie puede causar problemas. Tiene una escala temporal de nueve meses, aproximadamente, lo que deriva en un desfase al detectar condiciones de sequía sobre la base del componente
	SMA	P, T, CAD	Creado por Bergman, Sabol, y Miskus (1988) en el Servicio Meteorológico Nacional de EEUU, como método para evaluar las condiciones mundiales de	efectos de la temperatura y la precipitación en la humedad del suelo, comprende los aspectos principales del balance hídrico	humedad del suelo en los cálculos Resulta difícil de calcular debido a la necesidad de datos para distintas capas del suelo. Las estimaciones de la



Tipo		Variables			
de	Índice	de	Origen y aplicaciones	Ventajas	Desventajas
sequía		entrada*			
	ETDI	Mod	Creado por Narasimhan y	Analiza tanto la	La variabilidad espacial
			Sriniviasan (2005) en la	evapotranspiración real	del índice aumenta en
			Estación Agrícola	como potencial y	los meses de verano
			Experimental de Texas	permite detectar	durante el periodo de
			(Estados Unidos). Es un	periodos húmedos y	mayor
			producto semanal útil para	secos	evapotranspiración y de
			determinar el estrés hídrico		precipitación muy
			de los cultivos. Aplicable		variable
			donde se tengan datos		
			modelados obtenidos de un		
			modelo hidrológic o		
			mediante el modelo SWAT		
	SMDI	Mod	Creado por Narasimhan y	Tiene en cuenta el perfil	La información
			Sriniviasan (2005) en la	completo del suelo y	necesaria para calcular
			Estación Agrícola	distintas profundidades,	el índice se basa en el
			Experimental de Texas. Es	por lo que se puede	producto del modelo
			un producto semanal de la	adaptar a diversos tipos	SWAT (instrumento de
			humedad del suelo	de cultivo	evaluación del suelo y el
			calculado a distintas		agua). Hay problemas
			profundidades. Aplicable		de autocorrelación
			donde se tengan datos		cuando se utilizan todas
			modelados obtenidos de un		las profundidades
			modelo hidrológic o		
			mediante el modelo SWAT		
	NDVI	Sat	Desarrollado por Tarpley,	Innovador, dado que	El procesamiento de
			Schneider y Money (1984),	utiliza datos satelitales	datos es esencial para
			y Kogan (1995) en la	para vigilar la salud de	el índice, fase para la



dice					
	de	Origen y aplicaciones	Ventajas	Desventajas	
	entrada*				
		Administración Nacional	la vegetación en	cual es necesario contar	
		Oceánica y Atmosférica	relación con los	con un sistema sólido.	
		(NOAA) de Estados Unidos.	episodios de seguía.	El historial de los datos	
		` ,			
		satélite AVHRR de la NOAA.	excelente cobertura	amplio	
		Aplicable para vigilar las	espacial	·	
		mundo			
VHI	Sat	Creado por Kogan (1990) en	Tiene cobertura en todo	El periodo de registro de	
		la NOAA. Es un derivado del	el mundo y alta	los datos satelitales es	
		índice NDVI que utiliza datos	resolución	corto	
		del satélite AVHRR. Se usa			
		para detectar y vigilar las			
		sequías que afectan la			
		agricultura en todo el			
		mundo			
HDI	P, T, CAD	Parte del conjunto de	Su método de balance	En los cálculos no se	
		índices creados por Palmer	hídrico permite analizar	tiene en cuenta el	
		(1965) en la Oficina	el sistema hídrico en su	influjo humano, como	
		Meteorológica de Estados	integridad	las decisiones de	
		Unidos. Se basa en el PDSI		gestión y el riego	
		original y modificado para			
		tener en cuenta la sequía de			
		larga duración que influirá			
		en las componentes			
		hidrológicas			
		/HI Sat	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de Estados Unidos. Utiliza datos obtenidos del satélite AVHRR de la NOAA. Aplicable para vigilar las sequías agrícolas en todo el mundo (HI Sat Creado por Kogan (1990) en la NOAA. Es un derivado del índice NDVI que utiliza datos del satélite AVHRR. Se usa para detectar y vigilar las sequías que afectan la agricultura en todo el mundo HDI P, T, CAD Parte del conjunto de índices creados por Palmer (1965) en la Oficina Meteorológica de Estados Unidos. Se basa en el PDSI original y modificado para tener en cuenta la sequía de larga duración que influirá en las componentes	Administración Nacional la vegetación en Oceánica y Atmosférica (NOAA) de Estados Unidos. Utiliza datos obtenidos del satélite AVHRR de la NOAA. Aplicable para vigilar las sequías agrícolas en todo el mundo (HI Sat Creado por Kogan (1990) en la NOAA. Es un derivado del índice NDVI que utiliza datos del satélite AVHRR. Se usa para detectar y vigilar las sequías que afectan la agricultura en todo el mundo (HDI P, T, CAD Parte del conjunto de índices creados por Palmer (1965) en la Oficina Meteorológica de Estados Unidos. Se basa en el PDSI original y modificado para tener en cuenta la sequía de larga duración que influirá en las componentes	



a todos Al cambiar las fuentes
a todos Al cambiar las fuentes
a todos Al cambiar las fuentes
icos de de datos se tiene que
orciona recalcular el índice
de la completo, lo que
ológica dificulta la elaboración
uenca o de una serie cronológica
homogénea. Puesto que
los cálculos pueden
variar entre cuencas es
complicado comparar
cuencas o regiones
homogéneas
o de la Dado que no toma en
agua cuenta las aguas
e es un superficiales, es posible
esencial que la interpolación
nto de entre puntos (datos de
usos los pozos de agua
ipales subterránea) no sea
representativa de la
región o el régimen
climático
to de la Sólo representa los
audales caudales fluviales en el
onente contexto del
el seguimiento de sequías
le agua



Tipo		Variables			
de	Índice	de	Origen y aplicaciones	Ventajas	Desventajas
sequía		entrada*			
			asociados al SPI. Se puede	a los embalses y los	sin que se analicen
			aplicar donde se tengan	distintos usos	otros factores
			registros diarios o		
			mensuales de los caudales		
			fluviales		
	SDI	CF	Desarrollado por Nalbantis y	Permite analizar el	No toma en cuenta las
			Tsakiris (2008) en Grecia,	efecto de la sequía en	decisiones de gestión de
			con base en la metodología	los caudales fluviales a	las aguas superficiales,
			y los cálculos del SPI.	distintas escalas	y los periodos sin caudal
			Permite analizar los	temporales	pueden distorsionar los
			periodos húmedos y secos,		resultados
			de manera similar al SPI,		
			pero a partir de datos		
			mensuales de caudales		
			fluviales. Se requiere contar		
			con una serie histórica de		
			caudales y del limnímetro.		
	SRSI	CF, EM	Creado por Gusyev,	Tiene en cuenta el total	No tiene en cuenta los
			Hasegawa, Magome,	del caudal afluente y	cambios ocasionados
			Kuribayashi y Lee (2015) en	almacenamiento	por la gestión del
			Japón como método	asociados con cualquier	embalse ni las pérdidas
			sistemático para analizar los	sistema de embalses en	causadas por
			datos de los embalses en	concreto, y ofrece	evaporación
			condiciones de sequía. Se	información útil a los	
			utiliza donde se tengan	responsables del	
			registros mensuales de	abastecimiento de agua	
			caudales que ingresan a los	y proveedores de riego	
			I		



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tipo de sequía	Índice	Variables de entrada*	Origen y aplicaciones	Ventajas	Desventajas
			embalses y volúmenes medios de almacenamiento		

*Leyenda de las variables: AS = aguas subterráneas; CAD = contenido de agua disponible; CF = caudales fluviales; EM = embalse; MN = manto de nieve; Mod = modelado; P = precipitación; Sat = información satelital; T = temperatura. Fuente: elaboración propia a partir de OMM y GWP (2016).

En años recientes, debido a la gran relevancia y contribución que han tenido los métodos basados en inteligencia artificial en la modelización y predicción de los procesos hidrológicos y climáticos (Ardabili, Mosavi, Dehghani, & Varkonyi-Koczy, 2019), las técnicas aprendizaje automático de (mejor conocidas como learning machine) han sido utilizadas en combinación con algunos de los índices de seguía descritos arriba para la evaluación, monitoreo y pronóstico de la sequía. Por ejemplo, Rhee Im (2017)desarrollaron un modelo de pronóstico de seguía de alta resolución en Corea del Sur usando la técnica de los árboles extremadamente aleatorios y los índices SPI y SPEI; por su parte, Deo y Sahin (2015) aplicaron el algoritmo del aprendizaje automático extremo para la predicción del índice EDI en Australia; Park, Im, Jang y Rhee (2015) utilizaron tres enfoques de aprendizaje automático (bosque aleatorio, árboles de regresión potenciados y cubista), en conjunto con los índices SPI y NDVI, para realizar la evaluación y seguimiento de la sequía meteorológica y agrícola en Estados Unidos; Feng,



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Wang, Liu y Yu (2019) adoptaron tres métodos avanzados de aprendizaje automático (bosque aleatorio con corrección de sesgo, máquina de vectores de soporte y redes neuronales), en combinación con el índice SPEI para mejorar las predicciones de la sequía agrícola en el sureste de Australia; y Zhang, Chen, Xu y Ou (2019) utilizaron el método de redes neuronales artificiales y el índice SPEI para predecir sequías meteorológicas en la provincia de Shaanxi, China, entre muchas otras investigaciones.

Sin embargo, es importante mencionar que a pesar de la gran utilidad de los índices de seguía para realizar el monitoreo, evaluación y pronóstico del fenómeno (desde las perspectivas meteorológica, agrícola e hidrológica), ninguno de ellos es válido para evaluar el impacto socioeconómico de las seguías. La evaluación de este impacto es considerada por algunos expertos como un problema no resuelto y, hasta cierto punto, como una misión imposible (Marcos, 2001). Ello se debe sobre todo a que el fenómeno de la seguía provoca una compleja e intrincada red de efectos económicos, sociales y ambientales, que se acumulan de manera gradual y que pueden permanecer incluso años después de la terminación del evento (Ortega-Gaucin, 2012a); además, la información generada en torno al fenómeno por lo general es poca y dispersa, lo cual obstaculiza la realización de cálculos exactos, confiables y oportunos de sus efectos y de la gravedad de los mismos y, en última instancia, impide o limita en gran manera la formulación de planes de contingencia por la mayoría de los gobiernos de los países afectados (Wilhite, 2000). Entonces, por la



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

naturaleza misma del fenómeno, no existe una respuesta única y definitiva a la pregunta ¿Cuál es el impacto socioeconómico de una seguía? Los impactos totales y sectoriales dependerán de la duración y extensión territorial del fenómeno; de la cuantía de la reducción en la disponibilidad de agua (Ortega-Gaucin, 2012b); así como de las condiciones económicas tanto estructurales como coyunturales, incluyendo la etapa de desarrollo y los precios de los cultivos afectados (Sisto, Guajardo-Quiroga, & Aguilar-Barajas, 2011), entre otras variables. Los impactos de la insuficiencia del agua se traducen en menor producción e ingreso, pues los volúmenes disponibles durante el periodo de seguía no alcanzan para satisfacer la demanda de agua en condiciones normales. Así, la evaluación de la seguía en términos económicos se hace base en conceptos como: principalmente con productividad, ingreso, eficiencia, desempleo, etcétera (Sisto et al., 2011). Para el sector agropecuario, los análisis económicos en términos de superficies cosechadas y siniestradas, volumen de la producción, valor de la producción, cabezas de ganado perdidas, entre otros elementos, proporcionan indicadores de impacto de la seguía y reflejan, quizá mejor que en los otros sectores, que el déficit hídrico tiene severos efectos negativos en un ámbito totalmente dependiente del recurso (Velasco, 2002; Ortega-Gaucin, 2012a; Ortega-Gaucin, 2012b).

Sin embargo, para gestionar el riesgo de sequía de manera efectiva es importante comprender los posibles impactos, aunque sea en términos relativos, e identificar quién estará en riesgo y por

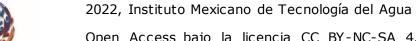


Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

qué. Por ello, evaluar el peligro, exposición, vulnerabilidad y riesgo implica en cierto sentido la predicción de la gravedad y el alcance de la amenaza, así como sus posibles efectos en la economía y la sociedad, a la vez que permite a los tomadores de decisiones diseñar medidas para prevenir y mitigar los impactos (Ortega-Gaucin & Velasco, 2015). De ahí la importancia de hacer análisis y evaluaciones de estas variables.

Exposición a la sequía

El IPCC (2014) define la exposición como la presencia de personas, propiedades, medios de vida y sistemas que están sujetos a daños y pérdidas potenciales debido al peligro. En los últimos años, la mayor exposición de la población a fenómenos meteorológicos extremos ha resultado en mayor número de desastres. La exposición es un factor que genera vulnerabilidad, de tal forma que si no hay exposición a un fenómeno específico no existe riesgo (Magaña, 2013). En el contexto de una sequía meteorológica y agrícola, por ejemplo, la exposición incluye a los cultivos de temporal, así como a los agricultores y ganaderos que trabajan en este sector, quienes están expuestos a perder su fuente de trabajo, alimentación e ingreso económico (Ortega-Gaucin, De-la-Cruz-





Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Bartolón, & Castellano-Bahena, 2018a); en el caso de una sequía hidrológica, incluye a todos los usuarios de aguas superficiales y subterráneas, como son los distritos y unidades de riego, las hidroeléctricas, los usuarios públicos urbanos e industriales, y todas la personas del medio rural que carecen de agua suficiente para desarrollar sus actividades cotidianas.

Características que influyen en la evaluación de la exposición

De acuerdo con el estudio realizado por el Banco Interamericano de Desarrollo (Cardona, 2005), los indicadores que cumplen mejor la función de medir la exposición y/o susceptibilidad física ante cualquier tipo de desastre son los que reflejan población susceptible, activos, inversiones, producción, medios de sustento, patrimonios esenciales y actividades humanas; también pueden considerarse como indicadores de este tipo los que reflejan tasas de crecimiento y densidad poblacional. Según Füssel (2005), en las evaluaciones de exposición relacionadas con el clima se deben tomar en cuenta las características o factores del sistema expuesto; el tipo y número de factores de estrés y sus causas principales; sus efectos en el sistema, y el horizonte temporal de la evaluación, tal como se indica en la Tabla 2.



Tabla 2. Dimensiones fundamentales que describen la situación de la exposición.

sa/4.0/)

Dimensión o Característica	Pregunta	Opciones posibles
	¿Quién o	Una comunidad, una región
Sistema/método	qué está	geográfica, un sector económico,
	expuesto?	un sistema natural
		El cambio climático antrópico,
Peligro (o amenazas o	¿Expuesto	variabilidad natural del clima, la
factores de estrés)	a qué?	composición atmosférica, otros
		factores no climáticos
Las consecuencias (o		Viabilidad de los ecosistemas, la
efectos o atributos	¿Qué está	seguridad alimentaria, la salud
valorados o variables	en riesgo?	humana, los bienes económicos,
de interés)		otros bienes y servicios valorados
	¿Qué	Meses, años, décadas, siglos
	horizonte	
Escala temporal y espacial	de tiempo?	
	¿Qué	Estado, municipio, cuenca, región
	región?	hidrológica, país, continente

Fuente: elaboración propia a partir de Füssel (2005).



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Se ha demostrado que la exposición a la sequía aumenta la pobreza (Carter, Little, Mogues, & Negatu, 2007; Dercon, 2004). El impacto del riesgo de desastre en la pobreza se produce de forma visible (las pérdidas cuando se produce un desastre), así como a través de lo menos obvio: los hogares expuestos al riesgo meteorológico reducen la inversión en activos productivos, y al seleccionar actividades de bajo riesgo y bajo rendimiento (Cole et al., 2013; Elbers, Gunning, & Kinsey, 2007). Este vínculo de la exposición a la pobreza ante los peligros naturales puede crear un bucle de retroalimentación, en el que los hogares pobres no tienen más remedio que establecerse en zonas de riesgo y, por lo tanto, se enfrentan a mayores desafíos para escapar de la pobreza (Winsemius et al., 2018).

Métodos para calcular la exposición

Para evaluar la exposición a la sequía, los métodos basados en indicadores socioeconómicos y ambientales son los más ampliamente utilizados; tales indicadores por lo general se combinan entre sí para generar índices compuestos que son representativos de los diferentes grados de exposición (Hagenlocher *et al.*, 2019). Dicho enfoque metodológico contribuye a una mejor comprensión de la multidimensionalidad de esta



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

variable, lo cual es especialmente útil para los procesos de toma de decisiones encaminadas a la gestión del riesgo.

Modelos matemáticos

Algunos trabajos consideran la exposición como una componente de la vulnerabilidad (Burg, 2008; Ortega-Gaucin et al., 2018a; Ortega-Gaucin, De-la-Cruz-Bartolón, & Castellano-Bahena, 2018b; Fontaine Steinemann, 2009) y se basan en la definición de vulnerabilidad del IPCC (2001). Sin embargo, en otras investigaciones se contempla la exposición a la seguía de manera independiente a la vulnerabilidad como una componente del riesgo (Carrao, Naumann, & Barbosa, 2016; Frischen, Meza, Rupp, Wietler, & Hagenlocher, 2020; Ortega-Gaucin, Ceballos-Tavares, Ordoñez, & Castellano-Bahena, 2021) con base en el concepto de riesgo del IPCC (2014). Pero independientemente del marco conceptual adoptado, se han propuesto diversos modelos matemáticos para calcular la exposición. Peduzzi, Dao, Herold y Mouton (2009) presentan un modelo de factores que influyen en los niveles de pérdidas humanas por peligros naturales a escala mundial para el periodo 1980-2000, cuyo objetivo es monitorear la evolución del riesgo; la combinación de la frecuencia promedio anual de peligros y las poblaciones expuestas proporciona la exposición física. Welle y Birkmann (2015) proporcionan

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

un nuevo enfoque para evaluar el riesgo frente a los peligros naturales a escala de país. Carrao *et al.* (2016) proponen un modelo no compensatorio de la exposición a la sequía para estimar las pérdidas potenciales de diferentes tipos de desastres por sequía. Winsemius *et al.* (2018) investigan la exposición global de las personas pobres frente a las inundaciones y sequías en 52 países. Ahmadalipour, Moradkhani, Castelletti y Magliocca (2019) evalúan el riesgo de sequía a nivel nacional en África. Ortega-Gaucin *et al.* (2021) determinan el riesgo de sequía agrícola en Zacatecas, México. En la Tabla 3 se presentan los modelos matemáticos que utilizan los autores mencionados para calcular la exposición.

Tabla 3. Modelos matemáticos más usuales para calcular la exposición.

Autor	Fórmula	Descripción
Peduzzi <i>et al.</i> (2009)	$PhExp = \sum_{i}^{n} F Pop_{i}$ $PhExp = \sum_{i}^{n} \frac{Pop_{i}}{Y_{i}}$	Donde <i>PhExp</i> es la exposición física promedio anual para la unidad espacial (población expuesta/año); <i>F</i> , la frecuencia anual de un evento de magnitud dada (evento/año); <i>Popi</i> , la población total que vive en la unidad espacial para cada evento "i" (población expuesta/evento); <i>n</i> , el número de eventos considerados Donde <i>PhExp</i> es la exposición física media anual para la unidad espacial (población expuesta/año); <i>Popi</i> , la población
	Y_n	que vive en el área afectada para cada evento " i " (población expuesta/evento); Y_n , el periodo de tiempo (año)
Welle y	Exp	Donde <i>Exp</i> es la exposición; <i>A</i> , las personas expuestas a
Birkma nn	$= \frac{A + B + C + (0.5 * D + E)}{}$	terremotos; B, las personas expuestas a tormentas; C, las
(2015)	= <u>N</u>	personas expuestas a inundaciones; D, las personas



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

		expuestas a sequías; E , las personas expuestas al aumento del nivel del mar; N , el número de población
Carrao <i>et al</i> . (2016)	$de_i = \overline{OR_i}/\overline{OR'}_{i'}$	Donde de_i es la exposición a la sequía; $\overline{OR_i}$, la distancia multivariante entre el origen y los valores reales de los indicadores observados para la región i ; $\overline{OR'}_i$, la distancia entre el origen y los valores regionales proyectados en la frontera de máxima exposición
Winsemius <i>et</i> al. (2018)	$I_p = \frac{f_p}{f} - 1,$	Donde I_P es el sesgo de exposición a la pobreza (PEB); fp y f , la fracción de personas expuestas a inundaciones/sequías en el país, respectivamente
Ahmadalipour et al. (2019)	$Exp = \frac{Esposición_{fut;p}}{Exposición_{hist}}$	Donde <i>Exp</i> es la exposición; <i>hist y fut</i> indican periodos históricos y futuros; y <i>p</i> , escenarios de población (baja, media y alta)
Ortega- Gaucin <i>et al.</i> (2021)	$DEI = \sum_{i=1}^{n} X_i W_i$	Donde DEI es el índice de exposición a la sequía; X_i , el valor normalizado del indicador i ; W_i , el peso del indicador normalizado i ; n , el número de indicadores de exposición a la sequía

Fuente: elaboración propia.

Para que un índice de exposición a la sequía sea de fácil uso y procesamiento, su formulación se debe basar en un número menor de indicadores que reflejen aspectos relevantes y orientadores del tipo de acción que se requiere llevar a cabo por los tomadores de decisiones. Este conjunto de indicadores por sí solos y, sobre todo, desagregados en lo local podrían facilitar la identificación y orientación de las acciones que se deben promover, fortalecer o priorizar para lograr un mayor nivel de seguridad frente



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

al peligro. Así, de todos los indicadores posibles, hay que seleccionar un número reducido de ellos con base en la disponibilidad de datos a juicio personal o por investigación previa (Ortega-Gaucin *et al.*, 2018b; Ortega-Gaucin *et al.*, 2021).

Vulnerabilidad ante la sequía

Las evaluaciones de vulnerabilidad ante la sequía son el primer paso en la identificación de las causas subyacentes que generan los impactos de las mismas (González, Urquijo, Blauhut, Villarroya, & De-Stefano, 2016). La vulnerabilidad ante una sequía es compleja, por lo que es necesario comprenderla para así poder diseñar estrategias de preparación y mitigación, al igual que políticas y programas de ayuda (Patrick, 2003). A continuación se describen los conceptos y los aspectos metodológicos más utilizados para hacer una evaluación de vulnerabilidad ante la sequía (Figura 4).



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

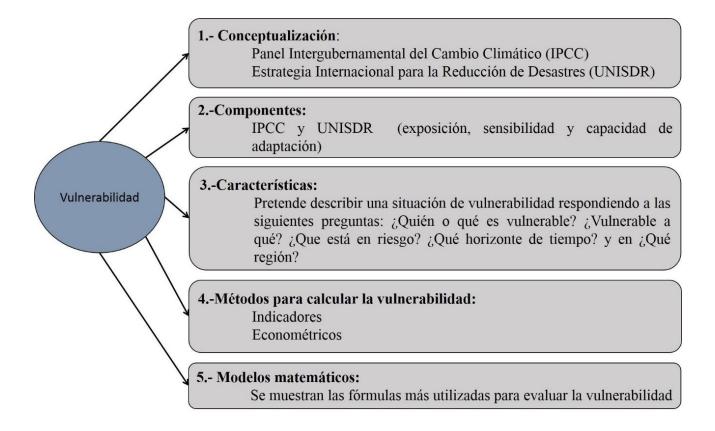


Figura 4. Diagrama metodológico para evaluar la vulnerabilidad ante la sequía. Fuente: elaboración propia.

Conceptualización de vulnerabilidad

Los conceptos y definiciones de vulnerabilidad han sido analizados por autores como Timmerman (1981); Kates (1985); Chambers (1989);

Tecnología y

Ciencias Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Downing (1991); Anderson (1994); Blaikie et al. (1994); Bohle, Downing y Watts (1994); Downing y Bakker (2000), y Birkmann (2007), entre otros. Con base en los conceptos esgrimidos por estos autores se puede afirmar que, de manera general, la vulnerabilidad es una condición de fragilidad o debilidad de un individuo o sistema ante algún tipo de amenaza (sea ésta de origen físico, como las seguías, terremotos, inundaciones; o de tipo antrópico, como los accidentes, devaluaciones, económicas, etc.); tiene carácter multifacético crisis un multidimensional; es dinámica tanto espacial como temporalmente, y siempre está vinculada con un peligro específico. En este caso, el peligro que nos interesa es el fenómeno de la seguía. Con respecto a ello, González et al. (2016) comentan que la mayoría de las definiciones de vulnerabilidad aplicadas a la seguía y a otros fenómenos climáticos se originan a partir de las definiciones del IPCC (IPCC, 2001; IPCC, 2014) y de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, 2009), las cuales se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Definiciones de vulnerabilidad según los enfoques del IPCC y UNISDR.

	Origen del concepto					
Concepto			I	PCC		UNISDR (2009)
	IPCC (2001)				IPCC (2014)	,
Definición de	Nivel	al	que	un		Las características y
vulnerabilidad	sisten	na		es	predisposición	circunstancias de una

	Origen del concepto						
Concepto	IPCO	UNISDR (2000)					
	IPCC (2001)	IPCC (2014)	UNISDR (2009)				
	susceptible o no es capaz de soportar los efectos adversos del cambio climático, incluidos la variabilidad climática y los fenómenos	afectado de manera	comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza				
Objetivo	extremos Considera la evaluación de la vulnerabilidad como el resultado esperado del análisis	Pone énfasis en cómo reducir y gestionar los riesgos del cambio climático	Tiene por objeto poner de relieve los medios para la reducción del riesgo de desastres Considera a la vulnerabilidad como un paso dentro del proceso de evaluación del riesgo				



Fuente: elaboración propia a partir de IPCC (IPCC, 2001; IPCC, 2014), González *et al.* (2016) y Brooks (2003).

Con base en los conceptos anteriores, la vulnerabilidad ante la seguía se puede entender como el grado en que un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a los efectos adversos, daños o perjuicios causados por este fenómeno natural. De esta manera, vulnerabilidad se vincula con los impactos potenciales ocasionados por los episodios de seguía, y ha sido utilizada para evaluar la susceptibilidad de los sistemas socioeconómicos y ambientales ante esta amenaza. Algunos ejemplos donde se aplica la definición del IPCC (2001) son los trabajos elaborados por Chandrasekar et al. (2009); Deems (2010); Flörke, Wimmer v Laaser (2011); Antwi-Agyei, Fraser, Dougill, Stringer y Simelton, (2012), y De-Stefano, González, Ballesteros, Urquijo y Blauhut (2015). Asimismo, la definición del IPCC (2014) es empleada por Bouroncle et al. (2016), Guo et al. (2019), Meza et al. (2020), y Frischen et al. (2020). Finalmente, con respecto a la definición de la UNISDR (2009), algunos ejemplos de su uso se encuentran en los trabajos elaborados por Iglesias, Moneo y Quiroga, (2007); Adepetu y Berthe (2007); Cheng y Tao (2010); Zarafshani et al. (2012); Naumann, Barbosa, Garrote, Iglesias y Vogt (2013), y Safavi, Esfahani y Zamani (2014).



Componentes de la vulnerabilidad

Originalmente, el IPCC (2001) propuso el concepto de vulnerabilidad como una función de la exposición de un sistema a la variación climática, de su sensibilidad y de su capacidad de adaptación. Sin embargo, en su quinto informe de evaluación, el IPCC (2014) modificó la concepción de estos términos, dejando a la vulnerabilidad solamente en función de la sensibilidad y capacidad de adaptación de un sistema (Figura 5a). El componente de exposición pasó a formar parte del concepto de riesgo, tal como se describirá más adelante. Por su parte, la UNISDR (2009) afirma que las componentes de la vulnerabilidad son la exposición y capacidad de adaptación (Figura 5b). En la Tabla 5 se describen cada uno de los componentes mencionados en función del origen del concepto.

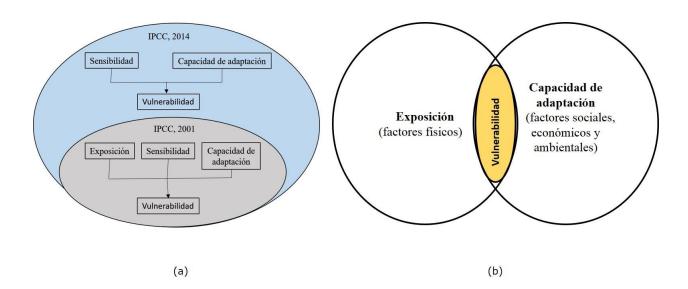


Figura 5. Componentes de la vulnerabilidad según los enfoques del IPCC (a) y la UNISDR (b). Fuente: elaboración propia a partir de IPCC (IPCC, 2001; IPCC, 2014) y UNISDR (2009).

sa/4.0/)

Tabla 5. Componentes de la vulnerabilidad según los enfoques del IPCC y la UNISDR.

Origen	Componentes		
del concepto	Exposición	Sensibilidad	Capacidad de adaptación
	Grado en que un sistema está	Es el grado por el que está	Es la habilidad de un sistema de ajustarse
	expuesto a	afectado un	al cambio climático
	variaciones climáticas	sistema, en	(incluida la variabilidad del clima y
IPCC	importantes	perjudicial o en	sus extremos) para
(2001)		sentido beneficioso, por	moderar daños posibles, aprovecharse
		razón de	de oportunidades o
		estímulos relacionados con	enfrentarse a las consecuencias
		el clima	Consecuencias
IPCC	La presencia de	Es el grado en	Es el proceso de
(2014)	personas; medios de	que un sistema se ve afectado,	ajuste al clima real o proyectado, y sus

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Origen	Componentes		
del concepto	Exposición	Sensibilidad	Capacidad de adaptación
	subsistencia;	ya sea de modo	efectos. En los
	especies o	adverso o	sistemas humanos, la
	ecosistemas;	beneficioso, por	adaptación trata de
	funciones,	estímulos de	moderar o evitar los
	servicios y	cambio climático	daños, o aprovechar
	recursos		las oportunidades
	ambientales;		beneficiosas. En
	infraestructura;		algunos sistemas
	o activos		naturales, la
	económicos,		intervención humana
	sociales o		puede facilitar el
	culturales en		ajuste al clima
	lugares y		proyectado y sus
	entornos que		efectos
	podrían verse		
	afectados de		
	forma negativa		
	Se refiere a la		Habilidad de la
UNISDR	población,		población,
(2009)	propiedades,		organizaciones y
(2003)	sistemas u otros		sistemas mediante el
	elementos		uso de recursos y



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Origen	Componentes		
del concepto	Exposición	Sensibilidad	Capacidad de adaptación
	presentes en las		destrezas disponibles
	zonas donde		de enfrentar y
	existen		gestionar condiciones
	amenazas y, por		adversas, situaciones
	consiguiente,		de emergencia o
	están expuestos		desastres
	a experimentar		
	pérdidas		
	potenciales. Las		
	medidas del		
	grado de		
	exposición		
	pueden incluir la		
	cantidad de		
	personas o los		
	tipos de bienes		
	en una zona		

Fuente: elaboración propia a partir de IPCC (IPCC, 2001; IPCC, 2014) y UNISDR (2009).

De los enfoques conceptuales anteriores, el más aceptado y utilizado por la comunidad científica en los últimos años es el



propuesto por el IPCC (2014), el cual define la vulnerabilidad en función de la sensibilidad y capacidad de adaptación de los sistemas analizados, tal como se puede observar en la creciente cantidad de investigaciones que lo utilizan (Bouroncle *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2019; Frischen *et al.*, 2020; Meza *et al.*, 2020, entre otros).

Características que influyen en la evaluación de la vulnerabilidad

De acuerdo con Füssel (2005), en las evaluaciones de vulnerabilidad relacionadas con el clima se deben tomar en cuenta las características o factores del sistema vulnerable, tipo y número de factores de estrés y sus causas principales, efectos en el sistema y el horizonte temporal de la evaluación, tal como se indica en la Tabla 6.

Tabla 6. Características fundamentales que describen una situación de vulnerabilidad.

Característica	Pregunta	Opciones posibles	
	¿Quién o qué	Una comunidad, una región	
Sistema/método	es	geográfica, un sector económico, un	
	vulnerable?	sistema natural	



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Característica	Pregunta	Opciones posibles
		Cambio climático antrópico,
Peligro (o amenazas o	¿Vulnerable a	variabilidad natural del clima,
factores de estrés)	qué?	composición atmosférica, otros
		factores no climáticos
Las consecuencias (o		Viabilidad de los ecosistemas,
efectos o atributos	¿Qué está en	seguridad alimentaria, salud
valorados o variables de	riesgo?	humana, bienes económicos, otros
interés)		bienes y servicios valorados
	Tiempo: ¿Qué	
	horizonte de	Años, décadas, siglos
Escala	tiempo?	
	Espacial:	Estado, municipio, cuenca, región
	¿Qué región?	hidrológica, país, continente

Fuente: adaptada de Füssel (2004).

Métodos para calcular la vulnerabilidad

Los métodos más utilizados en la literatura relativa al cambio climático son el método econométrico y los métodos basados en indicadores (Tabla 7). El método econométrico tiene sus raíces en la literatura de la pobreza y el desarrollo; hace uso de los datos de encuestas socioeconómicas en



hogares para analizar el nivel de vulnerabilidad de los diferentes grupos sociales (Hoddinott & Quisumbing, 2003). Los métodos basados en indicadores se fundamentan en la selección de algunas variables de todo el conjunto de indicadores potenciales para después combinarlas sistemáticamente, a fin de evaluar los niveles de vulnerabilidad (Cutter, Boruff, & Shirley, 2003; Kaly & Pratt, 2000).

Tabla 7. Métodos para calcular la vulnerabilidad.

Concepto	Método econométrico	Métodos basados en indicadores
Descripción	El método se divide en tres categorías: la vulnerabilidad como la pobreza esperada (VEP), la vulnerabilidad de utilidad baja esperada (VEU), y la vulnerabilidad como la exposición al riesgo no asegurado (VER) (Hoddinott & Quisumbing, 2003). Con estas categorías se construye una medida de la pérdida de bienestar atribuido a desastres (Deressa, Hassan, & Ringler, 2008)	seleccionar algunos indicadores de todo el conjunto de indicadores potenciales y luego combinarlos sistemáticamente para determinar los niveles de vulnerabilidad
Ventajas	El método es fácil de estimar. Con el cálculo de VEP se pueden	

		Métodos basados en
Concepto	Método econométrico	indicadores
	identificar los hogares en riesgo	tendencias y explorar
	que no son pobres; el cálculo del	marcos conceptuales
	VEU proporciona una	(Deressa <i>et al.</i> , 2008).
	desagregación entre la	Integra y resume
	vulnerabilidad a la pobreza y la	diferentes dimensiones
	vulnerabilidad al riesgo no	de un tema, son fáciles
	asegurado; finalmente, el cálculo	de interpretar, y facilita
	del VER puede indicar si son las	la evaluación de la
	covariables o los choques	eficacia de las políticas
	idiosincrásicos la causa principal	y la rendición de
	de las pérdidas de bienestar	cuentas por parte de
	(Hoddinott & Quisumbing, 2003)	los representantes del
		gobierno (Schuschny &
		Soto, 2009)
	Si las estimaciones se realizan	Conducen a una falta
	utilizando una única sección	de correspondencia
	transversal se debe suponer que	entre la definición
	la variabilidad transversal captura	conceptual de
Desventajas	la variabilidad temporal	vulnerabilidad y las
	(Hoddinott & Quisumbing, 2003),	métricas (Deressa <i>et</i>
	además es difícil explicar el tipo de	al., 2008)
	riesgo de un individuo, dado que	
	los individuos están mal	

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Concepto	Método econométrico	Métodos basados en indicadores
	informados acerca de ellos	
	(Kanbur, 1987); a falta de	
	conjuntos de datos, las	
	estimaciones de los impactos a	
	menudo son parciales y, por lo	
	tanto, no son indicadores	
	concluyentes (Deressa <i>et al.</i> ,	
	2008)	

Fuente: elaboración propia.

De manera similar a la exposición a la sequía, los métodos basados en indicadores socioeconómicos y ambientales son los que más se utilizan para evaluar la vulnerabilidad; estos indicadores se combinan entre sí para generar índices compuestos representativos de los diferentes grados de vulnerabilidad (Hagenlocher *et al.*, 2019). Este enfoque permite comprender mejor las diferentes facetas de esta variable, y orientar las acciones dirigidas a su reducción mediante la implementación de medidas preventivas y de mitigación de la sequía.

Modelos matemáticos



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Dado que la vulnerabilidad se manifiesta en lugares y momentos específicos (Adger, 2006), existen diversos modelos matemáticos para calcularla. En este caso se observan algunas similitudes que tienen los modelos que se presentan en esta sección, por ejemplo: los modelos de Webb y Harinarayan (1999), y del IPCC (IPCC, 2001; IPCC, 2014) reconocen a la capacidad de adaptación como parte importante en mitigar el impacto de la amenaza; en el caso de Fontaine y Steinemann (2009), modificaron el modelo del IPCC (2001), donde la exposición y sensibilidad se suman y el resultado se divide entre la capacidad de adaptación; Luers, Lobell, Sklar, Addams y Matson (2003) miden la vulnerabilidad en función del estado de las variables de interés en relación con un umbral de daño, la sensibilidad de las variables a los factores estresantes, y la magnitud y frecuencia de los factores estresantes a los que está expuesto el sistema; Me-Bar y Valdez (2005) ven a la vulnerabilidad como el nivel del umbral para un desastre; Burg (2008) concibe a la vulnerabilidad como la probabilidad de una disminución aguda o déficit crónico de acceso a los alimentos o el consumo por debajo de un valor crítico; Ortega-Gaucin et al. (2018a y 2018b) desarrollan un índice de vulnerabilidad global a la seguía que incluye la vulnerabilidad económica, social y ambiental de los sistemas analizados; y Ortega-Gaucin et al. (2021) proponen evaluar la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas ante la seguía en función de los índices de sensibilidad y capacidad de adaptación. En la Tabla 8 se

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

presentan los modelos matemáticos más comunes para calcular la vulnerabilidad.

Tabla 8. Modelos matemáticos más usuales para calcular la vulnerabilidad.

Autor	Descripción	Formula
Webb & Harinarayan (1999)	Utilizaron la fórmula para estudiar la relación entre vulnerabilidad y desnutrición	V = H - CA
IPCC (2001)	Proporciona una definición operativa de la vulnerabilidad	V = CA - (S + E) Donde CA es la capacidad de adaptación; S , sensibilidad; E , exposición
Luers <i>et al.</i> (2003)	Examina la vulnerabilidad de los sistemas socioecológicos	$V = \frac{SE}{ERA\ x\ POE}$ Donde V es vulnerabilidad; SE , sensibilidad al estrés; ERA , estado relativo al umbral; POE , probabilidad de ocurrencia de estrés
Me-Bar y Valdez (2005)	Proporcionaron un modelo que fue utilizado por	$i - C_i + \sum_{i=1}^{n} i$

Autor	Descripción	Formula
	(2012) para evaluar la vulnerabilidad de	Donde P en esta fórmula es un valor de parámetro; W , un peso asignado a cada parámetro; C se deriva de Ci = $1/2$ (W máx ki) a la suma de todos los pesos, donde W máx es el valor máximo de la escala de peso
Burg (2008)		
Fontaine y Steinemann (2009)	Desarrollaron un modelo conceptual modificando el modelo propuesto por el IPCC (2001) para evaluar la vulnerabilidad ante la sequía	$V = \frac{E+S}{CA}$ Donde E es la exposición; S , sensibilidad; CA , la capacidad de adaptación
IPCC (2014)	Modifica la definición operativa de la	V = S - CA

Autor	Descripción	Formula
	vulnerabilidad que se realizó en 2001	Donde <i>S</i> es sensibilidad; <i>CA</i> , capacidad de adaptación
Ortega- Gaucin <i>et</i> <i>al</i> . (2018a y 2018b)	Proponen un índice de vulnerabilidad global ante la sequía que incluye la vulnerabilidad económica, social y ambiental	vulnerabilidad global ante la sequía; IVE, el índice de vulnerabilidad
Ortega- Gaucin <i>et</i> <i>al</i> . (2021)		$DVI = \frac{1}{2}$ Donde DVI es el índice de vulnerabilidad a la sequía agrícola; SI , índice de sensibilidad; y ACI es

Fuente: elaboración propia.



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

De los modelos matemáticos anteriores, el que ha sido más aceptado y usado por la comunidad académica internacional es el propuesto por el IPCC (2014), el cual modifica la definición operativa de la vulnerabilidad que realizó este mismo organismo en 2001, expresándola en función de la sensibilidad y capacidad de adaptación (dejando fuera la componente de exposición, que pasó a formar parte del concepto de riesgo).

Así, a partir de la combinación de los análisis de exposición, vulnerabilidad y amenaza de un sistema específico, es posible determinar el nivel de riesgo de ese sistema ante la sequía, con base en los conceptos de riesgo que se describen a continuación.

Riesgo

El concepto de riesgo, asociado con la idea de porvenir sin certeza, ha estado presente desde siempre en las sociedades humanas (Cardona, 2001). En este apartado se describen las diferentes definiciones de riesgo y los modelos matemáticos para calcularlo.



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Definiciones de riesgo

La extinta Organización de las Naciones Unidas para el Socorro en Desastres (UNDRO, 1979) contempla dos definiciones de riesgo que se consideran la base de los conceptos actuales; la primera es el riesgo específico y la segunda es el riesgo total: a) riesgo específico (specific risk-Rs): grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un evento particular, y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad; b) riesgo total (total risk-Rt): número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de un evento desastroso, es decir, el producto del riesgo específico (Rs) y los elementos bajo riesgo (E). Por su parte, la UNISDR (2009) define el riesgo como las posibles pérdidas que ocasionaría un desastre en términos de vidas, condiciones de salud, medios de sustento, bienes y servicios, y que podrían ocurrir en una comunidad o sociedad particular en un periodo específico de tiempo en el futuro. Por último, el IPCC (2014) define el riesgo como potencial de consecuencias en que algo de valor está en peligro con un desenlace incierto, reconociendo la diversidad de valores. A menudo el riesgo se representa como la probabilidad de acaecimiento de sucesos o tendencias peligrosos multiplicada por los impactos en caso de que ocurran tales sucesos o tendencias. Los riesgos resultan de la interacción de vulnerabilidad, exposición y peligro. El término riesgo se utiliza principalmente en referencia a los riesgos de impactos del cambio climático.



Modelos matemáticos para calcular el riesgo

Existen diferentes marcos y ecuaciones para evaluar el riesgo. En este apartado se explican algunos modelos, por ejemplo, Yen (1971) calcula el riesgo como la probabilidad de un evento adverso; la UNDRO (1979) determina el riesgo en función de la exposición, amenaza y vulnerabilidad; Cardona (1985), y Schneiderbauer y Ehrlich (2004) tomaron el modelo propuesto por la UNDRO (1979) y lo modificaron, en el primer caso eliminando la variable de exposición y en el segundo caso anexando el aspecto temporal; Cardona (2001) hace una evaluación holística del riesgo, tomando en cuenta la fragilidad socioeconómica y la falta de resiliencia del contexto; Davis (2004), en su modelo, incorpora la capacidad de adaptación, ya que el desarrollo de capacidades puede desempeñar un papel fundamental para minimizar la escala de los desastres; Jordaan (2006) propone un modelo para evaluar el riesgo de seguía agrícola considerando las características del peligro (probabilidad, severidad e intensidad) y tres tipos de vulnerabilidad (económica, social y ambiental); Ortega-Gaucin et al. (2018b) desarrollaron una determinar índices municipales metodología para vulnerabilidad y riesgo por seguía, evaluando el peligro a partir de los registros históricos de seguía del Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

y considerando cuatro tipos de vulnerabilidad (económica, social, ambiental y global), y Ortega-Gaucin *et al*. (2021) propusieron un método para calcular el riesgo por sequía agrícola considerando sus tres componentes esenciales: peligro, exposición y vulnerabilidad a la sequía. En la Tabla 9 se presentan las fórmulas de los modelos matemáticos referidos.

Tabla 9. Modelos matemáticos más usuales para calcular el riesgo.

Autor	Fórmula	Descripción
Yen (1971)	$R = 1 - P(X \le x)^n$	Donde P ($X \le x$) es la probabilidad acumulada y n el número de años, suponiendo estacionariedad e independencia de los acontecimientos extremos
UNDRO (1979)	Rt = E x RS = E x(A x V)	Donde Rt es el riesgo total; E, la exposición; RS, el riesgo específico; A, la amenaza; V, la vulnerabilidad
Cardona (1985)	Rie = f(Ai, Ve)	Donde Rie es el riesgo; A_i , la amenaza; V_e , la vulnerabilidad
Schneiderbauer y Ehrlich (2004)	$R_{ahd} = H_{ahd} x E_{ad} x V_{ahd}$	Donde R_{ahd} es el riesgo; E , la exposición; V , la vulnerabilidad; " h ", el tipo de



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Autor	Fórmula	Descripción
		peligro; "a", la región
		geográfica afectada por el
		peligro " <i>h</i> "; " <i>d</i> ", un día
		determinado dentro del
		periodo de tiempo durante el
		cual se produce el desastre
Cardona (2001)	$R_T = R_F(1+F)$	Donde R_T es el riesgo total; R_F ,
		el riesgo físico, y F es un
		coeficiente de agravamiento
		-o de impacto- que depende
		de la fragilidad socioeconómica
		FS y de la falta de resiliencia
		del contexto FR
	$R = \frac{V \times H}{CA}$	Donde R es el riesgo; V , la
Davis (2004)		vulnerabilidad, H, el peligro o
		amenaza; CA, la capacidad de
		adaptación
		Donde $H = f(H_P H s)$, con H_p es
Jordaan (2006)	R $= (H$ $/C_{H}) x \left[\frac{\sum (V_{econ}V_{env} V_{soc})}{\sum (C_{econ} C_{env} C_{soc})} \right]$	la probabilidad de sequía con
		una cierta magnitud
		(severidad) que se produzca;
		H_s , la severidad de la sequía H ;
		$H_s = f(Hi Hd); Hi, la intensidad$
		de la sequía; H_d , la duración de



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Autor	Fórmula	Descripción
		la sequía H ; $C_H = 1$; V_{econ} , la vulnerabilidad económica; V_{env} , la vulnerabilidad ambiental; V_{soc} , la vulnerabilidad social; C_{econ} , la capacidad para tratar con vulnerabilidad económica; C_{env} , la capacidad para tratar con la vulnerabilidad ambiental, y C_{soc} es la capacidad para tratar con la vulnerabilidad vulnerabilidad social
Burg (2008)	Riesgo(R) = V + H	Donde <i>V</i> es la vulnerabilidad y <i>H</i> es peligro o amenaza
Ortega-Gaucin et al. (2018b)	$IR = Px \ IVG$	Donde IR es el índice de riesgo por sequía; P, la probabilidad de ocurrencia de sequía (peligro por sequía); e IVG es el índice de vulnerabilidad global ante la sequía (descrito en la Tabla 8)
Ortega-Gaucin et al. (2021)	$DRI = \frac{DHI + DEI + DVI}{3}$	Donde <i>DRI</i> es el índice de riesgo por sequía agrícola; <i>DHI</i> , el índice de peligro por



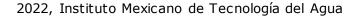
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Autor	Fórmula	Descripción
		sequía; <i>DEI</i> , el índice de
		exposición a la sequía, y <i>DVI</i>
		es el índice de vulnerabilidad a
		la sequía

Fuente: elaboración propia.

En términos generales, lo que se puede deducir de los modelos matemáticos descritos es que todos ellos utilizan las variables de peligro o amenaza, y vulnerabilidad como componentes esenciales del riesgo por sequía, incluyendo en algunos casos la exposición como variable independiente. En los últimos años, la fórmula matemática más comúnmente aceptada y utilizada es la que considera el riesgo como un producto del peligro (representado por la probabilidad de ocurrencia de sequía con cierto grado de severidad), la exposición y la vulnerabilidad (evaluadas mediante indicadores socioeconómicos y ambientales), tal como se puede observar en los trabajos de Carrao et al. (2016), Frischen et al. (2020) y Meza et al. (2020), entre otros. Ello está en consonancia con el concepto de riesgo propuesto por el IPCC (2014), que ha sido el más aceptado y difundido en la comunidad científica actual.

Consideraciones





Como se ha visto en este trabajo, hoy día existe una amplia gama de enfoques, métodos y herramientas para determinar las componentes del riesgo por sequía. Aquí se han resumido los resultados de una amplia revisión de literatura que ha sido generada en distintas partes del mundo. El hecho de revisar y recopilar los distintos métodos de forma sistemática puede servir para adaptar y mejorar la eficacia de las evaluaciones realizadas. Aunque existe una gran diversidad de enfoques y opciones metodológicas, lo cierto es que no hay métodos que sean universalmente aplicables para hacer estas evaluaciones, pues el fenómeno de la sequía depende de muchos factores contextuales y sus efectos son distintos en cada caso.

De acuerdo con la Convención de las Naciones Unidas para el Combate de la Desertificación (UNCCD), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la Asociación Mundial para el Agua (GWP), y la Organización Meteorológica Mundial (WMO), para mejorar las evaluaciones de la vulnerabilidad y el riesgo ante la sequía, los tomadores de decisiones y los responsables de formular políticas públicas pueden tomar en cuenta los siguientes aspectos (UNCCD/FAO/GWP/WMO, 2019):

 Adoptar un enfoque proactivo para realizar las evaluaciones antes de que se presenten las crisis por seguía.



- Reconocer que la sequía es a menudo un fenómeno recurrente que interactúa con otras amenazas, y puede verse exacerbado por los patrones de gestión de recursos hídricos y terrestres.
- Utilizar los métodos de evaluación disponibles para fomentar enfoques inclusivos, intersectoriales y de múltiples escalas para la evaluación de la vulnerabilidad, y el riesgo a nivel comunitario y de cuenca.
- Aprender a partir de prueba/error, y revisar según las experiencias de otros, qué métodos son los más adecuados para fomentar la participación en las evaluaciones de vulnerabilidad de diferentes grupos sociales.
- Analizar dónde y cómo se deben recopilar, analizar y proteger los datos dispersos.
- Documentar los éxitos y fracasos de las evaluaciones, incluidos los casos en que los impactos de la sequía fueron más o menos graves de lo previsto en las condiciones climáticas prevalecientes.
- Aprender de las experiencias de los demás participando en un intercambio internacional coordinado de conocimientos, y abogar por el uso de estos procesos, incluida la revisión, validación, documentación y difusión.

Anticipar los resultados de un evento que aún no ha sucedido puede resultar difícil, pero en muchas regiones afectadas por la sequía ya se conocen muy bien sus efectos. En estas áreas, las estimaciones de vulnerabilidad y riesgo son procesos informales y continuos que forman parte de la cultura popular. La integración y



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

coordinación de tales estimaciones informales con procesos colectivos de evaluaciones formales y bien documentadas que involucren a organizaciones de la sociedad civil, gobiernos locales, federales y otras instituciones pueden crear un entendimiento compartido más amplio, además de que ofrecen una base más prometedora para compartir y gestionar el riesgo a todos los niveles.

Conclusiones

La reducción del riesgo de sequía y sus impactos directos e indirectos asociados se ha convertido en una prioridad mundial, como lo muestra el número cada vez mayor de enfoques, métodos y herramientas de evaluación que se han publicado en las últimas décadas. Los esfuerzos por reducir los impactos de la sequía deben basarse en una comprensión sólida, y una caracterización fiable del fenómeno que conduzca a evaluaciones precisas para la toma de decisiones y la implementación de políticas públicas orientadas a ese objetivo. Sin embargo, aunque se han realizado grandes avances en los últimos años en términos de desarrollar mejores métodos y herramientas para caracterizar los componentes individuales del riesgo, aún queda mucho por hacer en ese sentido. La



Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

revisión realizada en este trabajo ha mostrado que existe una gran diversidad de conceptos y métodos para este propósito, ninguno de los cuales es aplicable a todas las circunstancias, pues cada contexto específico requiere determinar cuál es el más apropiado en función del enfoque adoptado, la información disponible y el objetivo de la evaluación. Con la información que se proporciona en este artículo, los investigadores o evaluadores disponen de un panorama general que, en un momento dado, les puede servir de base para hacer un examen cuidadoso de cada uno de estos puntos, y elegir el marco teórico y el método que mejor se ajuste al contexto de su estudio o, en su defecto, para desarrollar o adaptar su propia propuesta conceptual y metodológica.

Es importante resaltar que, independientemente de los conceptos o modelos matemáticos que se adopten para evaluar el riesgo por sequía y sus componentes, la atención de los efectos causados por el fenómeno debe basarse en un enfoque proactivo de gestión del riesgo, es decir, en la planeación y diseño de estrategias (medidas estructurales y no estructurales sobre una base continua) que se pondrán en marcha con antelación a la ocurrencia de una sequía para prevenir y mitigar el nivel de exposición al riesgo y, por lo tanto, la vulnerabilidad a los impactos.

Agradecimientos

Este artículo se realizó con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), en el marco del proyecto de investigación PDCPN-



2017/4924 del Programa de Proyectos de Desarrollo Científico para atender Problemas Nacionales. Agradecemos los comentarios y sugerencias de dos revisores anónimos que permitieron mejorar el artículo.

sa/4.0/)

Referencias

- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16, 268-281. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006
- Adepetu, A. A., & Berthe, A. (2007). *Vulnerability of rural Sahelian households to drought: Options for adaptation.* A Final Report. Submitted to Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change (AIACC), Proj. No. AF 9. Washington, DC, USA: The International START Secretariat.
- Ahmadalipour, A., Moradkhani, H., Castelletti, A., & Magliocca, N. (2019). Future drought risk in Africa: Integrating vulnerability, climate change, and population growth. *Science of the Total Environment* 662, 672-686. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.278
- Anderson, M. B. (1994). Vulnerability to disaster and sustainable development: A general framework for assessing vulnerability. In: Munasinghe, M., & Clarke, C. (eds.). Disaster prevention for sustainable development: Economic and policy issues. A Report from the Yokohama World Conference on Natural Disaster Reduction. May 23-27. Washington, DC, USA: World Bank.
- Antwi-Agyei, P., Fraser, E. D., Dougill, A. J., Stringer, L. C., & Simelton, E. (2012). Mapping the vulnerability of crop production to drought in



- Ghana using rainfall, yield and socioeconomic data. *Applied Geography*, 32(2), 324-334. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.06.010
- Ardabili, S., Mosavi, A., Dehghani, M., & Varkonyi-Koczy, A. R. (2019). *A deep learning and machine learning in hydrological processes climate change and earth systems a systematic review*. Preprints. Recuperado de https://doi.org/10.20944/preprints201908.0166.v1
- Barakat, F., & Handoufe, A. (1998). Approche agroclimatique de la sécheresse agricole au Maroc. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 9(3), 201-208.
- Bergaoui, M., & Alouini, A. (2001). Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique: cas du Bassin Versant de Siliana en *Tunisie. Science et Changements Planétaires / Sécheresse*, 12(4), 205-213.
- Bergman, K. H., Sabol, P., & Miskus, D. (1988). Experimental indices for monitoring global drought conditions. In: *Proceedings of 13th Annual Climate Diagnostics Workshop*. Cambridge, USA: United States Department of Commerce.
- Bhuiyan, C. (2004). Various drought indices for monitoring drought condition in Aravalli Terrain of India. Proceedings of the XXth ISPRS Istanbul, Turkey: International Society Conference. for Photogrammetry Remote Sensing. Recuperado de and http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm7/papers/2 43.pdf



- BID, Banco Interamericano de Desarrollo. (2003). *Programa de información e indicadores de gestión de riesgos*. Manizales, Colombia: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Birkmann, J. (2007). Risk and vulnerability indicators at different scales: applicability, usefulness and policy implications. *Environmental Hazards*, 7, 20-31. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.envhaz.2007.04.002
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., & Wisner, B. (1994). *At risk: Natural hazards, people vulnerability, and disasters*. London, UK, and New York, USA: Routledge Publishers.
- Bohle, H. G., Downing, T. E., & Watts, M. J. (1994).Climate change and social vulnerability. Toward a sociology and geography of food insecurity. *Global Environmental Change*, 4(1), 37-48. Recuperado de https://doi.org/10.1016/0959-3780(94)90020-5
- Boken, V. K. (2005). Agricultural drought and its monitoring and prediction: some concepts (vol. 472). New York, USA: Oxford University Press.
- Bouroncle, C., Rodríguez, C., Florián, M., Naswa, P., Lærke, S., & Olhoff, A. (2016). Sistema Nacional de Indicadores de Adaptación al Cambio Climático (SIACC): definición del conjunto de indicadores. Bogotá: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Bootsma, A., Boisvert, J., & Baier, R. (1996). La sécheresse et l'agriculture canadienne: une revue des moyens d'action. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 7(4), 277-285.
- Brooks, N. (2003). Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework. *Tyndall Centre for Climate Change Research Working*



- Paper, 38(38), 1-16. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/200032746_Vulnerability _Risk_and_Adaptation_A_Conceptual_Framework
- Burg, J. (2008). Measuring populations' vulnerabilities for famine and food security interventions: The case of Ethiopia's chronic vulnerability index. *Disasters*, 32(4), 609-630. Recuperado de https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2008.01057.x
- Burton, I., Kates, R. W., & White, G. F. (1978). *The environment as hazard*. New York, USA: Oxford University Press.
- Byun, H. R., & Wilhite, D. A. (1999). Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12(9), 2747-2756.

 Recuperado de https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2747:OQODSA>2.0.CO;2
- Cardona, O. (2005). Indicadores de riesgo de desastre y de gestión de riesgos. Informe resumido. BID/IDEA programa de indicadores para la gestión del riesgo de desastres. Washington, DC, USA: Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de https://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/0/35060/INDICADOR ES_DE_RIESGO_DE_DESASTRES_BID.pdf
- Cardona, O. (2001). Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos (tesis doctoral). Barcelona. España: Universitat Politècnica de Catalunya. Recuperado de https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.50 0.11762/19751/HolisticaRiesgoSismicoBogota(Cardona_2001).pdf? sequence=1



Cardona, O. (1993). Evaluación de la amenaza la vulnerabilidad y el riesgo. Elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo. En: Maskrey, A. (comp.). *Los desastres no son naturales* (pp. 51-74). Ciudad de Panamá, Panamá: La Red.

sa/4.0/)

- Cardona, O. D. (1985). *Hazard, vulnerability and risk assessment*. Unedited working paper. Skopje, Yugoslavia: Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology.
- Carrao, H., Naumann, G., & Barbosa, P. (2016). Mapping global patterns of drought risk: An empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability. *Global Environmental Change*, 39, 108-124. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.04.012
- Carter, M. R., Little, P. D., Mogues, T., & Negatu, W. (2007). Poverty traps and natural disasters in Ethiopia and Honduras. *World Development*, 35(5), 835-856. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2006.09.010
- Chambers, R. (1989). Editorial introduction: Vulnerability, coping and policy. *Institute of Development Study IDS Bulletin*, 20(2), 1-7. Recuperado de https://opendocs.ids.ac.uk/opendocs/bitstream/handle/20.500.124 13/9551/IDSB_20_2_10.1111-j.1759-5436.1989.mp20002001.x.pdf?sequence=1
- Chandrasekar, K., Sai, M. S., Roy, P., Jayaraman, V., & Krishnamoorthy, R. (2009). Identification of agricultural drought vulnerable areas of Tamil Nadu, India using GIS-based multi criteria analysis. *Asian*



- Journal of Environment and Disaster Management, 1(1), 40-61. Recuperado de https://doi.org/10.3850/S17939240200900009X
- Cheng, J., & Tao, J. P. (2010). Fuzzy comprehensive evaluation of drought vulnerability based on the analytic hierarchy process: An empirical study from Xiaogan city in Hubei province. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 1, 126-135. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2010.09.015
- Cole, S., Gine, X., Tobacman, J., Topalova, P., Townsend, R., & Vickery, J. (2013). Barriers to household risk management: Evidence from India. *American Economic Journal: Applied Economics*, 5(1), 104-135. Recuperado de https://doi.org/10.1257/app.5.1.104
- Correia, F. N., Santos, M. A., & Rodrigues, R. R. (1991). Reliability in regional drought studies. In: Ganoulis J. (ed.). *Water resources engineering risk assessment* (pp. 43-62). Vol. G 29. Berlin, Germany: NATO ASI Series.
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Sciences Quarterly*, 84(2), 243-261. Recuperado de https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002
- Davis, I. (2004). Progress in analysis of social vulnerability and capacity.

 In: Bankoff, G., Frerks, G., & Hilhorst, D. (eds.). *Mapping vulnerability: Disasters, development and people*. London, UK: Earth Scan.
- Deems, H. J. (2010). Vulnerability of rural communities in the Mediterranean region to climate change and water scarcity: The case of Cyprus (Master thesis). Barcelona, España: Universitat de



Barcelona. Recuperado de https://www.cyi.ac.cy/images/projects/eewrc/clico/Deems_Rural_V ulnerability_Cyprus_thesis_Sep2010.pdf

- Deo, R. C. & Şahin, M. (2015). Application of the extreme learning machine algorithm for the prediction of monthly Effective Drought Index in eastern Australia. *Atmospheric Research*, 153, 512-525. Recuperado de http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.10.016
- Deressa, T., Hassan, R. M., & Ringler, C. (2008). *Measuring Ethiopian farmers' vulnerability to climate change across regional states. Food Policy*, Serie 806. Washington, DC, USA: International Food Policy Research Institute. Recuperado de http://www.ifpri.org/publication/measuring-ethiopian-farmers-vulnerability-climate-change-across-regional-states
- Dercon, S. (2004). Growth and shocks: Evidence from rural Ethiopia. *Journal of Development Economics*, 74(2), 309-329. Recuperado de

 Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2004.01.001
- De-Stefano, L., González, I., Ballesteros, M., Urquijo, J., & Blauhut, V. (2015). *Methodological approach considering different factors influencing vulnerability pan-European scale*. Drought-R&SPI Technical Rep. No. 26. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/274536771_METHODOL OGICAL_APPROACH_CONSIDERING_DIFFERENT_FACTORS_INFLUE NCING_VULNERABILITY_-_PAN-EUROPEAN_SCALE
- Downing, T. E. (1991). Assessing socioeconomic vulnerability to famine: Frameworks, concepts, and applications. Final Report to the US



- Agency for International Development, Famine Early Warning
 System Project. Recuperado de
 https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/pnabj875.pdf
- Downing, T. E., & Bakker, K. (2000). Drought discourse and vulnerability.
 In: Wilhite, D. A. (ed.). *Drought: A global assessment.* Natural Hazards and Disasters Series. London, USA: Routledge Publishers.

sa/4.0/)

- Dracup, J. A., Lee, K. S., & Paulson, J. R. (1980). On the statistical characteristics of drought events. *Water Resources Research*, 16(2), 289-296.
- Elbers, C., Gunning, J. W., & Kinsey, B. (2007). Growth and risk: Methodology and micro evidence. *The World Bank Economic Review*, 21(1), 1-20. Recuperado de https://doi.org/10.1093/wber/lhl008
- Feng, P., Wang, B., Liu, D. L., & Yu, Q. (2019). Machine learning-based integration of remotely-sensed drought factors can improve the estimation of agricultural drought in South-Eastern Australia. *Agricultural Systems*, 173, 303-316. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.015
- Flörke, M., Wimmer, F., & Laaser, C. (2011). Final Report for the Project Climate Adaptation modelling waterscenarios and sectoral impacts. Contract N° DG ENV.D.2/SER/2009/0034. Center for Environmental Systems Research, Kassel. Recuperado de https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ff6cb987-cdeb-483c-b569-b657111f504a/language-en
- Fontaine, M., & Steinemann, A. C. (2009). Assessing vulnerability to natural hazards: An impact-based method and application to drought



in Washington State. *Natural Hazards Review*, 10(1), 11-18. Recuperado de https://cig.uw.edu/publications/assessing-vulnerability-to-natural-hazards-an-impact-based-method-and-application-to-drought-in-washington-state/

- Frischen, J., Meza, I., Rupp, D., Wietler, K., & Hagenlocher, M. (2020). Drought risk to agricultural systems in Zimbabwe: A spatial analysis of hazard, exposure, and vulnerability. *Sustainability*, 12(3), 752. Recuperado de https://doi.org/10.3390/su12030752
- Füssel, H.-M. (2005). *Vulnerability in climate change research: A Comprehensive conceptual framework*. Recuperado de https://escholarship.org/content/qt8993z6nm/qt8993z6nm.pdf
- Füssel, H.-M. (2004). Coevolution of the political and conceptual frameworks for climate change vulnerability assessments. In: Proceedings of the 2002 Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change Knowledge for the Sustainability Transition. The Challenge for Social Science (pp. 302-320). Amsterdam, Berlin, Potsdam and Oldenburg Global Governance Project.
- Gibbs, W. J., Maher, J. V., & John, V. (1967). Rainfall deciles as drought indicators. In: *Bulletin (Commonwealth Bureau of Meteorology (Australia))*. No. 48 (p. 84). Melbourne, Australia: Bureau of Meteorology.
- González, T. I., Urquijo, J., Blauhut, V., Villarroya, F., & De-Stefano, L. (2016). Learning from experience: A systematic review of assessments of vulnerability to drought. *Natural Hazards*, 80(2),



- 951-973. Recuperado de https://doi.org/10.1007/s11069-015-2006-1
- Gusyev, M. A., Hasegawa, A., Magome, J., Kuribayashi, D. H., & Lee, S. (2015). Drought Assessment in the Pampanga River Basin, the Philippines. Part 1: A Role of Dam Infrastructure in Historical Droughts. *Proceedings of the 21st International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM 2015)*. Broadbeach, Queensland, Australia. DOI: 10.13140/RG.2.1.4931.4321
- Guo, Y., Huang, S., Huang, Q., Wang, H., Wang, L., & Fang, W. (2019).

 Copulas-based bivariate socioeconomic drought dynamic risk assessment in a changing environment. *Journal of Hydrology*, 575, 1052-1064.

 Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.010
- Hagenlocher, M., Meza, I., Anderson, C. C., Min, A., Renaud, F. G., Walz, Y., Siebert, S., & Sebesvari, Z. (2019). Drought vulnerability and risk assessments: State of the art, persistent gaps, and research agenda. *Environmental Research Letters*, 14(8), 083002. Recuperado de https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab225d/meta
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., & Widhalm, M. (2011). The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4), 485-488.
- Heim, Jr., R. R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1149-1166. Recuperado de



https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/83/8/1520-0477-83_8_1149.xml

sa/4.0/)

- Hoddinott, J., & Quisumbing, A. (2003). Methods for microeconometric risk and vulnerability assessment. In: *Risk, shocks, and human development* (pp. 62-100). London, UK: Palgrave Macmillan. Recuperado de https://doi.org/10.1057/9780230274129_4
- Iglesias, A., Moneo, M., & Quiroga, S. (2007). Methods for evaluating social vulnerability to drought (Part 1. Components of drought planning. 1.3. Methodological component). In: Iglesias, A., Moneo, M., & López-Francos, A. (eds.). *Drought management guidelines technical annex. Zaragoza: CIHEAM / EC MEDA Water, 129-133*. (Options Méditerranéennes: Série B. Etudes et Recherches; n. 58). Recuperado de http://om.ciheam.org/om/pdf/b58/00800538.pdf
- IPCC, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2014). Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre El Cambio Climático. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5_wgII_spm_e s-1.pdf
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. Field, C., Barros, V., Stocker, T., & Dahe, Q. (eds.). Cambridge University Press. Recuperado de



https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX_Full_Report.pdf

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change. (2001). The Scientific Basis. Cambridge, UK; New York, USA: Cambridge University Press. Recuperado de http://webpages.icav.up.pt/PTDC/CVT/098487/2008/IPPC,%20200 1.pdf

sa/4.0/)

- Jordaan, A. J. (2006). *Disaster risk assessment: Thumb sucking or scientific risk quantification?* Paper presented at Annual Congress: Disaster Management Institute of Southern Africa (DMISA) (pp. 1-12). Hartenbosch, South Africa.
- Kaly, U., & Pratt, C. (2000). Environmental vulnerability index: Development and provisional indices and profiles for Fiji, Samoa, Tuvalu and Vanuatu. Phase II report for NZODA. In: *SOPAC Technical Report 306*. (pp. 89). Suva, Fiji: SOPAC.
- Kanbur, R. (1987). The standard of living: Uncertainty, inequality and opportunity. In: Hawtorn, G. (ed.). *The standard of living*. New York, USA: Cambridge University Press.
- Kates, R. W. (1985). The interaction of climate and society. In: Kates, R. W., Ausubel, J. H., & Berbarian, M. (eds.). *Climate impacts assessment* (pp. 3-36). *Chichester*, UK: John Wiley. Recuperado de http://www.rwkates.org/pdfs/a1985.01.pdf
- Kogan, F. N. (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote*



- Sensing, 11(8), 1405-1419. Recuperado de https://doi.org/10.1080/01431169008955102
- Kogan, F. N. (1995). Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar orbiting satellite data. *Bulletin of the American Meteorology Society*, 76(5), 655-668. Recuperado de https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2
- Luers, A. L., Lobell, D. B., Sklar, L. S., Addams, C. L., & Matson, P. A. (2003). Method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. Global Environmental Change, 13(4), 255-267. Recuperado de https://yaquivalley.stanford.edu/pdf/luers_GEC_2003.pdf
- Magaña, V. (2013). *Guía metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad ante cambio climático*. México, DF, México: Instituto Nacional de Ecología y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Marcos, O. (2001). Sequía: definiciones, tipología y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, 26, 59-80. Recuperado de http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/363
- Me-Bar, Y., & Valdez, F, Jr. (2005). On the vulnerability of the ancient Maya society to natural threats. *Journal of Archaeological Science*, 32, 813-825. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.jas.2004.11.015
- Meza, I., Siebert, S., Döll, P., Kusche, J., Herbert, C., Eyshi-Rezaei, E., Nouri, H., Gerdener, H., Popat, E., Frischen, J., Naumann, G., Vogt, J. V., Walz, Y., Sebesvari, Z., & Hagenlocher, M. (2020). Global-scale



2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0

(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

- drought risk assessment for agricultural systems. *Natural Hazards* and *Earth System Sciences*, 20(2), 695-712. Recuperado de https://doi.org/10.5194/nhess-20-695-2020
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *AMS 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179-184. Recuperado de https://doi.org/citeulike-article-id:10490403
- Mishra, A., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012
- Modarres, R. (2007). Streamflow drought time series forecasting. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 21(3), 223-233.
- Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2008). Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 23(5), 881-897.
- Naumann, G., Barbosa, P., Garrote, L., Iglesias, A., & Vogt, J. (2013). Exploring drought vulnerability in Africa: An indicator-based analysis to inform early warning systems. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(10), 12217-12254. DOI: 10.5194/hess-18-1591-2014
- Narasimhan, B., & Srinivasan, R. (2005). Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1), 69-88. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.07.012



- NDMC, National Drought Mitigation Center. (1995). *Understanding the drought phenomenon: The role of definitions*. Lincoln, USA: National Drought Mitigation Center.
- OMM & GWP, Organización Meteorológica Mundial y Asociación Mundial para el Agua. (2006). *Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros.* Ginebra, Suiza. Organización Meteorológica Mundial y Asociación Mundial para el Agua. Recuperado de https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_drought_m onitoring_early_warning_es_2006.pdf
- OMM & GWP, Organización Meteorológica Mundial y Asociación Mundial para el Agua. (2016). *Manual de indicadores e índices de sequía.*Programa de Gestión Integrada de Sequías. Recuperado de http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP_Manual-de-indicadores_2016
- Ortega-Gaucin, D. (2012a). *Drought in Nuevo León: Vulnerability, impacts, and mitigation strategies*. Monterrey, México: Instituto del Agua del Estado de Nuevo León. Recuperado de https://agua.org.mx/biblioteca/sequia-en-nuevo-leon-vulnerabilidad-impactos-y-estrategias-de-mitigacion/
- Ortega-Gaucin, D. (2012b). *Impacto socio-económico de la sequía en un distrito de riego: estrategias para mitigarlo*. Saarbrücken, Alemania: Editorial Académica Española.
- Ortega-Gaucin, D., Ceballos-Tavares, J. A., Ordoñez, A., & Castellano-Bahena, H. V. (2021). Agricultural drought risk assessment: A spatial analysis of hazard, exposure, and vulnerability in Zacatecas, Mexico.



2022, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0

(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Water, 13(10), 1431. Recuperado de https://doi.org/10.3390/w13101431

- Ortega-Gaucin, D., De-la-Cruz-Bartolón, J., & Castellano-Bahena, H. V. (2018a). Drought Vulnerability Indices in Mexico. *Water*, 10 (11), 1671. MDPI AG. Recuperado de https://doi.org/10.3390/w10111671
- Ortega-Gaucin, D., De-la-Cruz-Bartolón, J., & Castellano-Bahena, H. V. (2018b). Hazard, vulnerability, and risk due to drought in the context of climate change in Mexico. In: *Water and climate change* (pp. 80-105). Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado de http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/2192
- Ortega-Gaucin, D., López, M., & Arreguín, F. I. (2016). Drought risk management in Mexico: Progress and challenges. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 6(2), 161-170. Recuperado de https://doi.org/10.2495/SAFE-V6-N2-161-170
- Ortega-Gaucin, D., & Velasco, I. (2015). Program of preventive and mitigation measures in the Río Balsas Basin Council, Mexico. In: Andreu, J., Solera, A., Paredes-Arquiola, J., Haro-Monteagudo, D., & Van-Lanen, H. (eds.). *Drought: Research and science-policy interfacing* (pp. 493-498). The Netherlands: CRC Press/Balkema. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/275963665_Program_of __Preventive_and_Mitigation_Drought_Measures_in_the_Rio_Balsa s_Basin_Council_Mexico



Palmer, W. C. (1968). Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index. *Weatherwise*, 21(4), 156-161. DOI: 10.1080/00431672.1968.9932814

sa/4.0/)

- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological drought*. Weather Bureau Research
 Paper No. 45. Washington, DC, USA: US Department of Commerce.
 Recuperado de
 https://www.droughtmanagement.info/literature/USWB_Meteorolog
 ical_Drought_1965.pdf
- Park, S., Im, J., Jang, E., & Rhee, J. (2015). Drought assessment and monitoring through blending of multi-sensor indices using machine learning approaches for different climate regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 216, 157-169. Recuperado de http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.10.011
- Patrick, E. (2003). Sequía: vulnerabilidad y crisis en las tierras áridas. New York, USA: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).
- Peduzzi, P., Dao, H., Herold, C., & Mouton, F. (2009). Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: The Disaster Risk Index. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1149-1159. Recuperado de https://nhess.copernicus.org/articles/9/1149/2009/nhess-9-1149-2009.pdf
- Rhee, J., & Im, J. (2017). Meteorological drought forecasting for ungauged areas based on machine learning: Using long-range climate forecast and remote sensing data. *Agricultural and Forest*



Meteorology, 237, 105-122. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.011

- Safavi, H. R., Esfahani, M. K., & Zamani, A. R. (2014). Integrated index for assessment of vulnerability to drought, case study: Zayandehrood River Basin, Iran. *Water Resources Management*, 28(6), 1671-1688. Recuperado de https://doi.org/10.1007/s11269-014-0576-4
- Shafer, B., & Dezman, L. (1982). Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in Snowpack Runoff Areas. In: *Proceedings of the Western Snow Conference* (pp. 164-175). Recuperado de https://westernsnowconference.org/sites/westernsnowconference.org/PDFs/1982Shafer.pdf
- Sisto, N., Guajardo-Quiroga, R., & Aguilar-Barajas, I. (2011). Estimación de los impactos económicos de una sequía. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(2), 111-123. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000200008&lng=es&tlng=es
- Schneiderbauer, S., & Ehrlich, D. (2004). Risk, hazard, and people's vulnerability to natural hazards: A review of definitions, concepts and data. *European Commission Joint Research Centre, EUR*, 21410, 40. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/268149143_Risk_Hazard _and_People's_Vulnerability_to_Natural_Hazards_a_Review_of_Definitions_Concepts_and_Data



- Schuschny, A., & Soto, H. (2009). *Guía metodológica, diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible*. Santiago de Chile, Chile: CEPAL, Naciones Unidas. Recuperado de https://www.cepal.org/es/publicaciones/3661-guia-metodologica-diseno-indicadores-compuestos-desarrollo-sostenible
- Tate, E. L., & Gustard, A. (2000). Drought definition: A hydrological perspective. In: Voght J. V., & Somma, F. (eds.). Drought and drought mitigation in Europe (advances in natural and technological hazard research). Vol 14. Dordrecht, The Netherlands: Springer. Recuperado de https://doi.org/10.1007/978-94-015-9472-1 3
- Tarpley, J. D., Schneider, S. R., & Money, R. L. (1984). Global vegetation indices from the NOAA7 meteorological satellite. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(3), 491-494. Recuperado de https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0491:GVIFTN>2.0.CO;2
- Tsakiris, G. (2007). Practical application of risk and hazard concepts in proactive planning. *European Water*, 19(20), 47-56. Recuperado de https://www.ewra.net/ew/pdf/EW_2007_19-20_05.pdf
- Tsakiris, G., Nalbantis, I., Vangelis, H., Verbeiren, B., Huysmans, M., Tychon, B., & Batelaan, O. (2013). A System-based paradigm of drought analysis for operational management. *Water Resources Management*, 27(15), 5281-5297. Recuperado de https://doi.org/10.1007/s11269-013-0471-4



- Timmerman, P. (1981). Vulnerability, resilience, and the collapse of society. In: *Environmental Monograph*, No. 1. Toronto, Canada: Institute for Environmental Studies, University of Toronto.
- UNCCD, FAO, GWP, & WMO, Convención de las Naciones Unidas para el Combate de la Desertificación, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, & Asociación Mundial para el Agua y Organización Meteorológica Mundial. (2019). Drought impact and vulnerability assessment: Available approaches and policy recommendations.

 UNCCD. Recuperado de https://www.unccd.int/publications
- UNISDR, Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. (2009).

 En: Terminología sobre reducción del riesgo de desastres, 43.

 Recuperado de http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf
- UNDRO, United Nations Disaster Relief Organization. (1979). *Natural disasters and vulnerability analysis*. Report of Experts Group Meeting. Geneva, Switzerland: UN, United Nations Disaster Relief Organization.
- Valiente, M. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas* (*España*), (26), 59-80. Universidad de Alicante Alicante, España. Recuperado de https://www.redalyc.org/pdf/176/Resumenes/Resumen_17602604 _1.pdf
- Van-Rooy, M. P. (1965). A rainfall anomaly index (RAI) independent of time and space. *Notos*, 14, 43-48.



- Velasco, I. (2002). *Plan de preparación para afrontar sequías en un distrito de riego* (tesis de Doctorado en Ingeniería Hidráulica). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Velasco, I., Ochoa, L., & Gutiérrez, C. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Región y Sociedad*, 17(34), 35-71. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-39252005000300002&lng=es&tlng=es
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. Recuperado de https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1
- Wanders, N., Van-Lanen, H. A. J., & Van-Loon, A. F. (2010). *WATCH Technical Report No. 24: Indicators for drought characterization on a global scale*. Recuperado de https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/160049
- Webb, P., & Harinarayan, A. (1999). A measure of uncertainty: The nature of vulnerability and its relationship to malnutrition. *Disasters*, 23(4), 292-305.
- Welle, T., & Birkmann, J. (2015). The World Risk Index An Approach to assess risk and vulnerability on a global scale. *Journal of Extreme Events*, 2(1), 1550003. Recuperado de https://doi.org/10.1142/S2345737615500037



- Wilhite, D. A. (ed.). (2005). *Drought and water crises: Science, technology, and management issues*. Boca Raton, USA: Taylor & Francis, CRC Press.
- Wilhite, D. A. (2000). Chapter 1 Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. In: Wilhite, D. (ed.). *Drought: A global assessment.* (pp. 3-18). London, England: Routledge. Recuperado de http://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/69
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). *Understanding the drought phenomenon: The role of definitions*. Recuperado de http://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/20
- Winsemius, C., Jongman, B., Veldkamp, I. E., Hallegatte, S., Bangalore, M., & Ward, P. J. (2018). Disaster risk, climate change, and poverty: Assessing the global exposure of poor people to floods and droughts. *Environment and Development Economics*, 23(3), 328-348. Recuperado de https://doi.org/10.1017/S1355770X17000444
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., & Davis, I. (2003). *At risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters* (2nd ed.). Recuperado de https://www.preventionweb.net/files/670 72351.pdf
- Wood, N. (2011). *Understanding risk and resilience to natural hazards*.

 Vancouver, USA: U.S. Geological Survey Fact Sheet: (p. 2).

 Recuperado de http://pubs.usgs.gov/fs/2011/3008/
- Yen, B. C. (1971). Risks in hydrologic design of engineering projects, *Journal of the Hydraulics Division*, 97(9), 1525-1526. Recuperado de https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0002476



Zhang, R., Chen, Z. Y., Xu, L. J., & Ou, C. Q. (2019). Meteorological drought forecasting based on a statistical model with machine learning techniques in Shaanxi province, China. *Science of the Total Environment*, 665, 338-346. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.431

sa/4.0/)

Zarafshani, K., Sharafi, L., Azadi, H., Hosseininia, G., De-Maeyer, P., & Witlox, F. (2012). Drought vulnerability assessment: The case of Wheat farmers in Western Iran. *Global and Planetary Change*, 98-99, 122-130. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.08.012