

# Determinación de periodos de retorno para infraestructura hidráulica

---



**MEDIO AMBIENTE**

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



**CONAGUA**

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

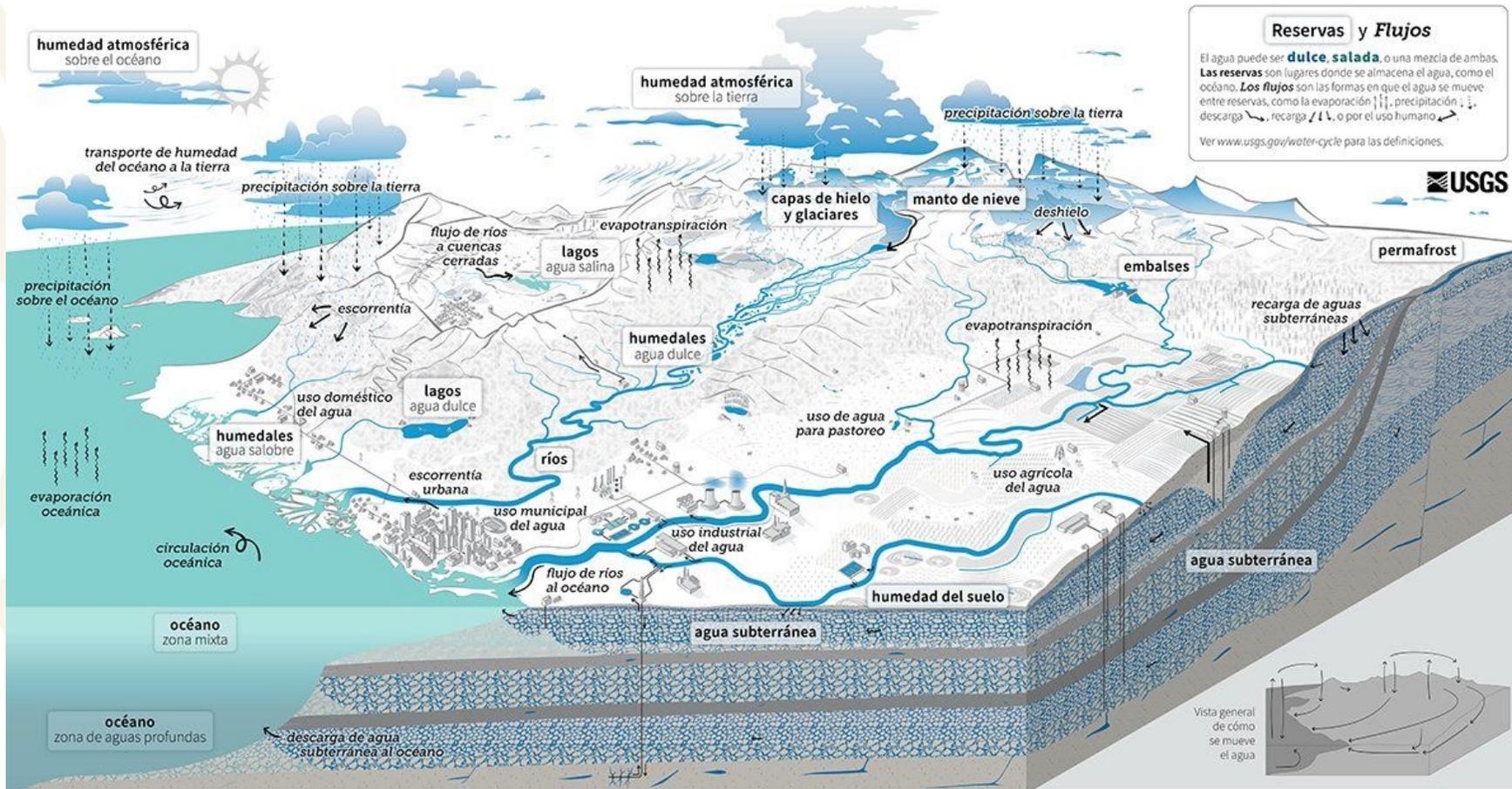


**2022** *Ricardo Flores*  
*Año de Magón*

PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

## Ciclo Hidrológico

Describe el **movimiento continuo y cíclico del agua** en la Tierra:



- Precipitación
- Evaporación
- Escurrimientos
- Infiltración
- Evapotranspiración

Fuente: Water Science School, USGS, 2022. *El ciclo del Agua*

(<https://www.usgs.gov/media/images/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish-png>)



# Antecedentes



MEDIO AMBIENTE  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



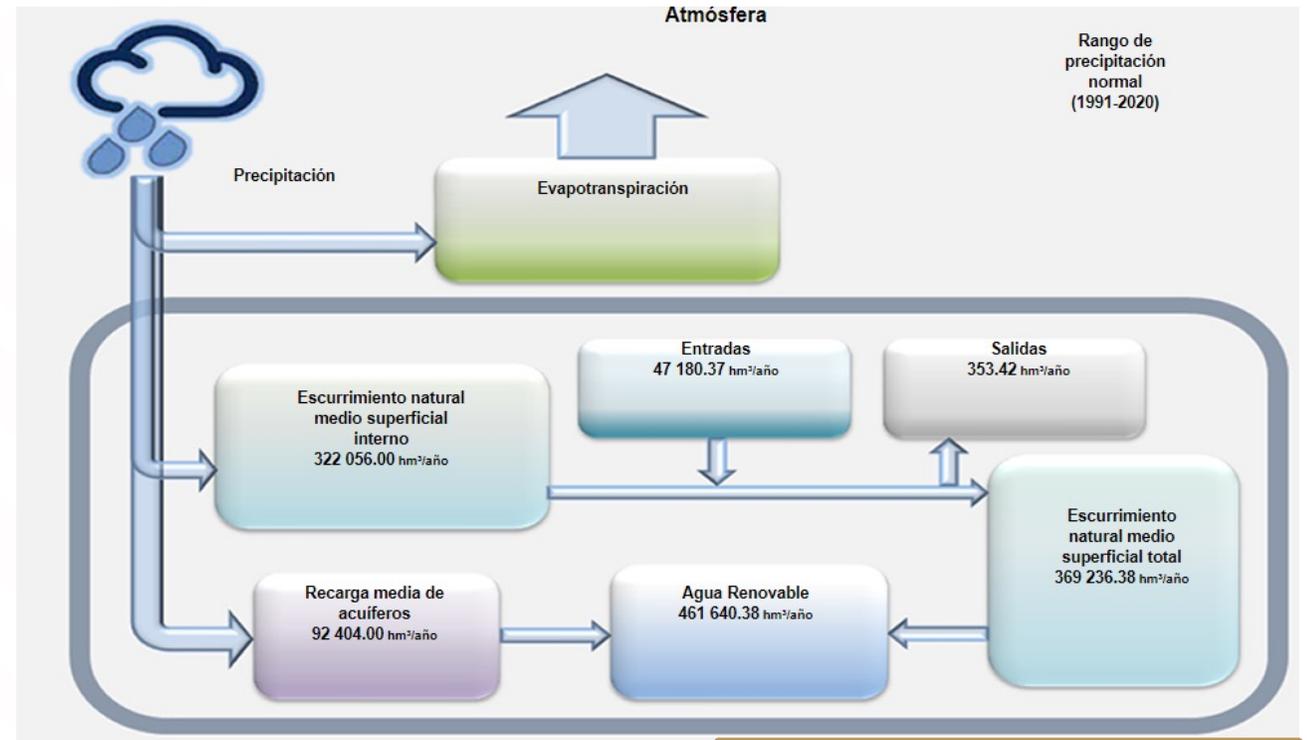
En México

**70%**

Es árido y semiárido, con gran probabilidad de ocurrencia de sequías intensas.

**30%**

Experimenta riesgo por inundaciones.



Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México a 2021



# Condiciones hidrológicas en el país



MEDIO AMBIENTE  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



CONAGUA  
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

La **situación climatológica de México** ocasiona que se presenten cada año diversas condiciones muy variables de lluvia y escurrimiento en las cuencas en el país, provocando **sequías o inundaciones**; aunado a los efectos de los ciclones tropicales, vaguadas y frentes fríos que inciden por ambos litorales y si bien aportan volúmenes muy importantes de agua, también pueden **causar daños a la población y a la infraestructura**.



Trayectorias registradas de huracanes en el último siglo



Presencia simultánea de ciclones en el Atlántico y el Pacífico



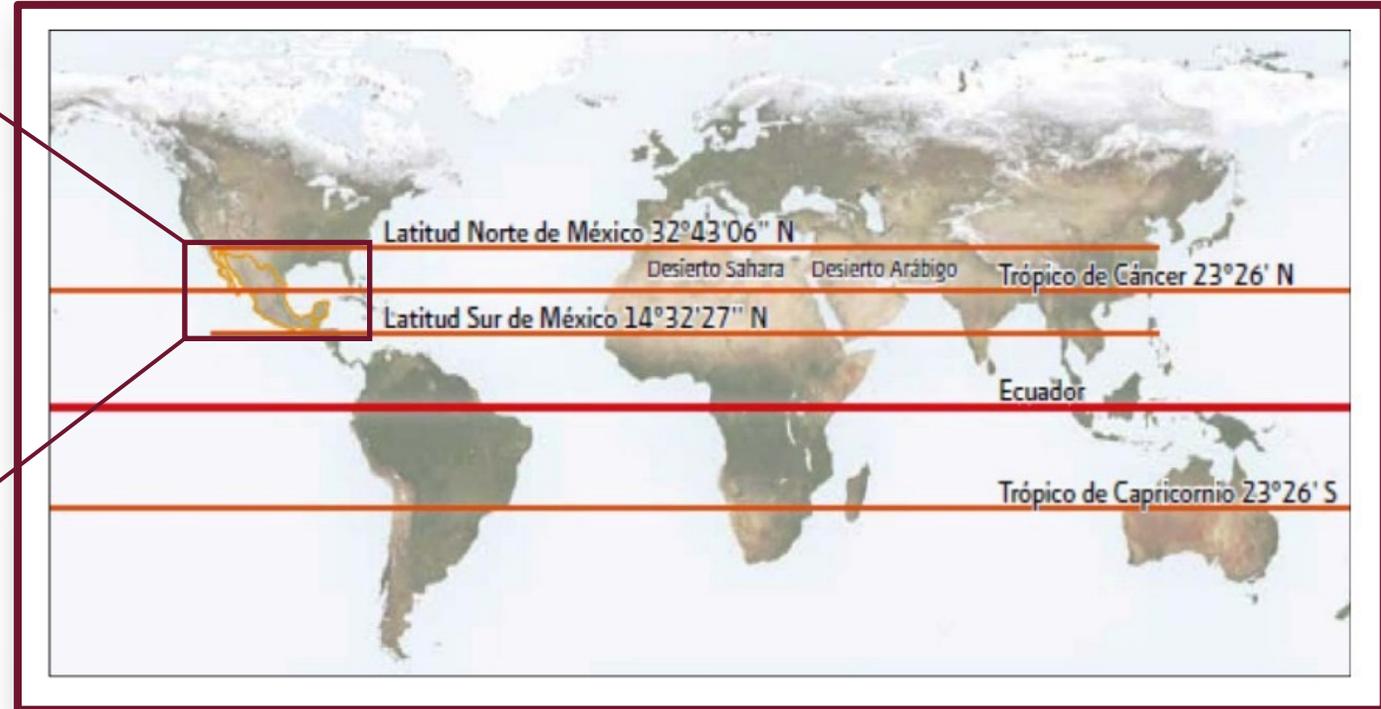
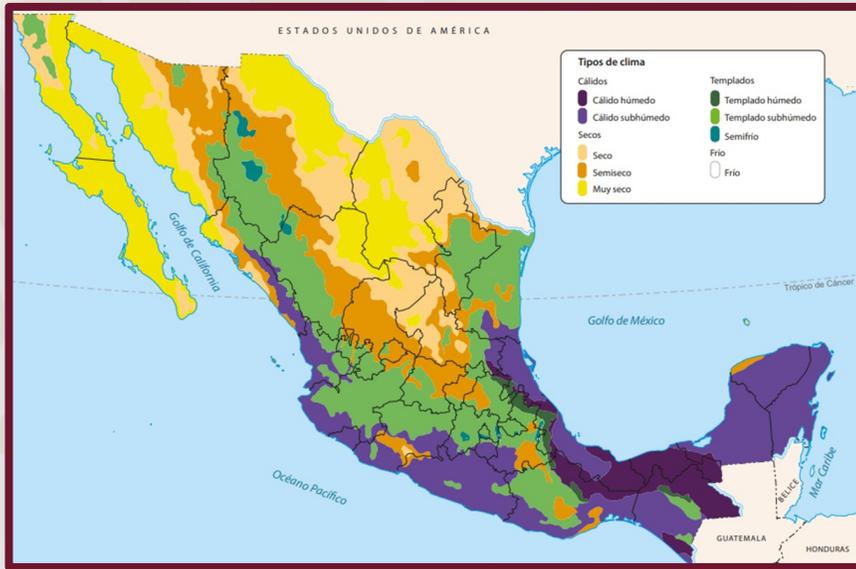
# Condiciones hidrológicas en el país



MEDIO AMBIENTE  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



CONAGUA  
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA



Los estados del Norte de nuestro país se ubican entre los 25 y 30° de latitud norte, donde **predominan las altas presiones, asociadas a descenso de aire**, lo que inhibe la formación de nubes y determina que estos estados, por naturaleza tengan un clima seco.



**El 90%** del área que ocupa los Estados del norte, tienen un clima seco a muy seco.



# Fenómenos hidrometeorológicos: Inundaciones

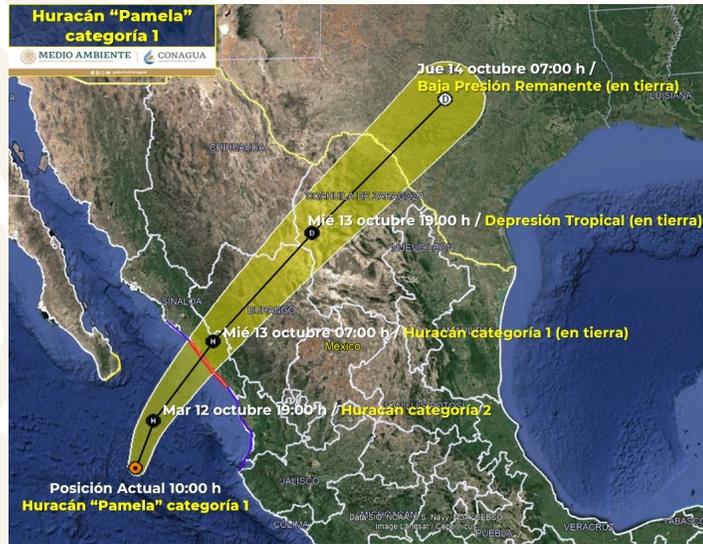


MEDIO AMBIENTE  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



CONAGUA  
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Las causas de las **inundaciones** pueden agruparse en tres grupos:



## Causas climáticas

- Debido a precipitaciones de duración o/e intensidad anormales como huracanes, frentes fríos, etc.

## Causas geológicas

- Se refieren a las características litológicas de la cuenca, de la red hidrográfica (formas, tipos), las características de los cauces (formas, pendientes), movimientos e inestabilidad de laderas y la limitación del desagüe de los ríos por acumulación de sedimentos en la desembocadura.

## Causas antrópicas

- Son las inducidas por la acción del ser humano, como son la deforestación, la invasión del cauce por construcciones diversas, rotura de presas, etc.



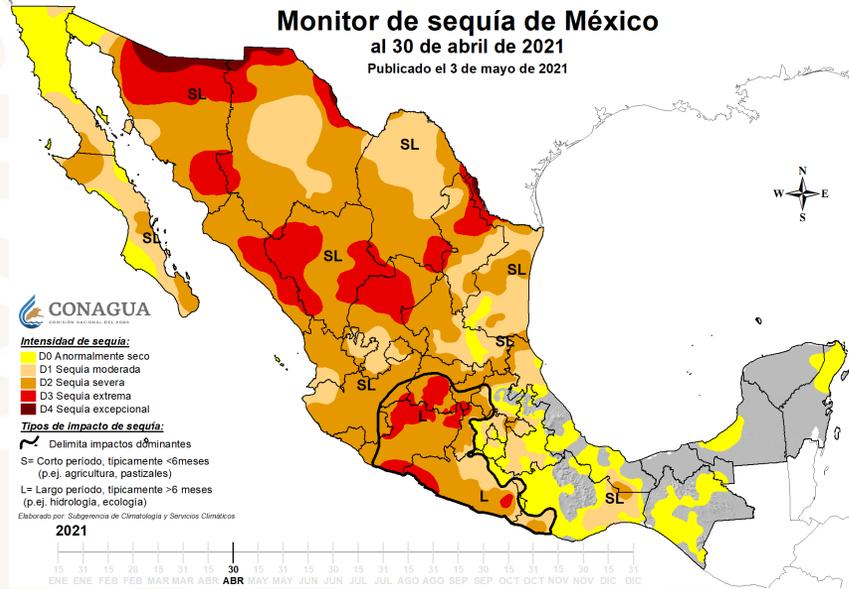
# Fenómenos hidrometeorológicos: Sequías



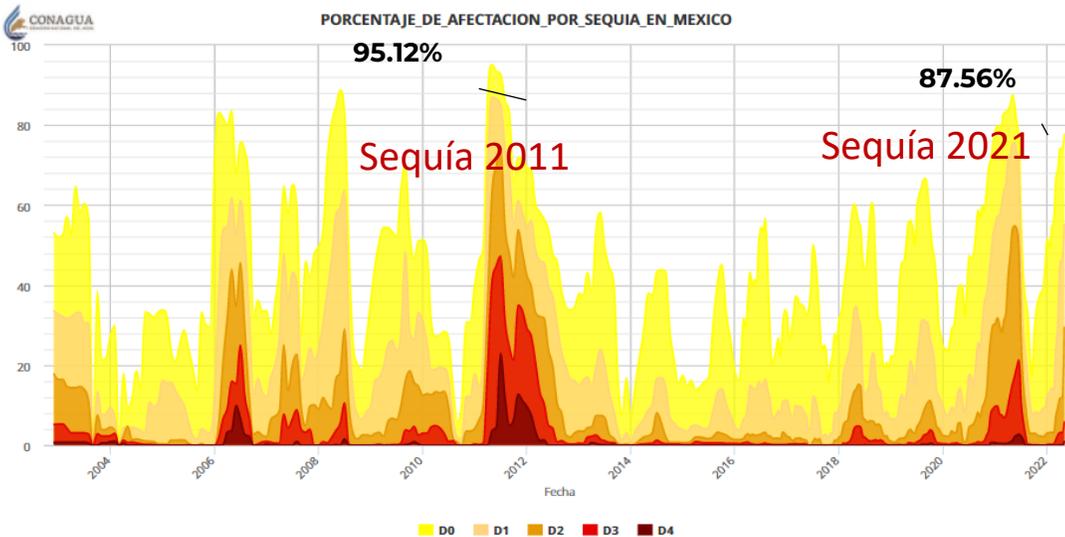
MEDIO AMBIENTE  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



CONAGUA  
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA



- Es el déficit transitorio o prolongado de lluvia que se caracteriza por un periodo de precipitaciones menores a las lluvias promedio de una región, cuyo inicio y conclusión es difícil de determinar.
- La sequía 2020-2021 ha sido la **más severa registrada en México, desde 2011**, de acuerdo con el Monitor de Sequía de la Comisión Nacional del Agua.
- El porcentaje de área con algún grado de sequía (D0 a D4) a nivel nacional fue de **87.56%**, el mayor valor se presentó el 30 de abril de 2021.



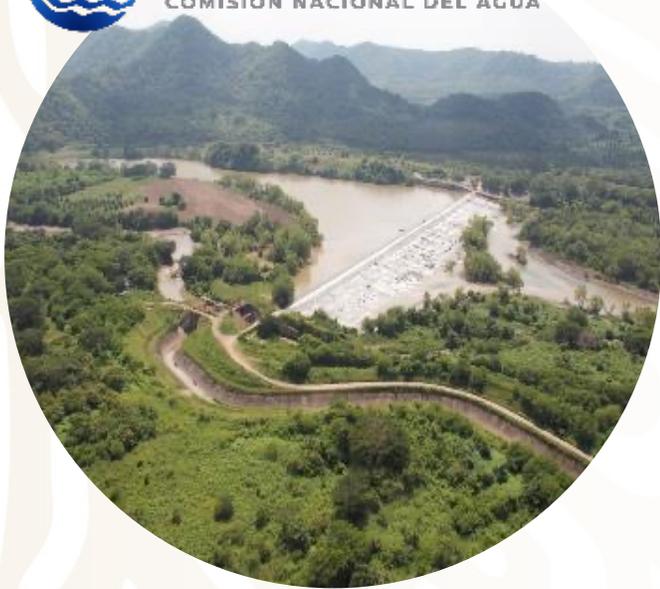
**El fenómeno de la sequía**, es uno de los que más impacta a las actividades económicas del país y a los almacenamientos de cuerpos de agua.

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se encarga de monitorear la evolución de dicho fenómeno, para ello se publica quincenalmente el **Monitor de Sequía en México (MSM)** en la página del SMN.

Fuente:

<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>





## Cuatro Funciones Sustantivas

La **CONAGUA** se encarga de:

1. **Administración ordenada y transparente del agua** para asegurar acceso a la población, a los sectores productivos y al ambiente.
2. **Servicios de agua, drenaje y saneamiento en bloque** a agricultores y a organismos operadores.
3. **Protección a la población ante fenómenos hidrometeorológicos**, como sequías e inundaciones.
4. **Infraestructura hidráulica** para conducir el agua y proteger a la población. Cuenta con el **Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento** que está dirigido a quienes diseñan, construyen, operan y administran los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento del país.

# Análisis estadístico y probabilístico en hidrología



- En el diseño o planeación de ciertas obras hidráulicas se requiere de **estimaciones de eventos futuros**.
- Por la complicación de los procesos físicos que intervienen en la generación del fenómeno, en la mayoría de los casos resulta imposible una estimación confiable del mismo por métodos basados en las leyes de la mecánica o la física, ya sea por ser éstos insuficientes o porque el modelo matemático respectivo resultaría exageradamente grande y difícil de manejar, pues necesitaría gran cantidad de información.
- Resulta más conveniente un **análisis estadístico y probabilístico**.
- La estimación de un fenómeno futuro está ligada a una probabilidad de ocurrencia, la cual se determina según una serie de criterios entre los que destacan:
  - la vida útil de la obra
  - la economía de la obra
  - los posibles daños humanos
  - materiales en caso de falla, etc.

# Análisis estadístico y probabilístico en hidrología



En el diseño de diversas obras de ingeniería, se emplean una serie parámetros de diseño que deben tenerse en cuenta al construir una obra:

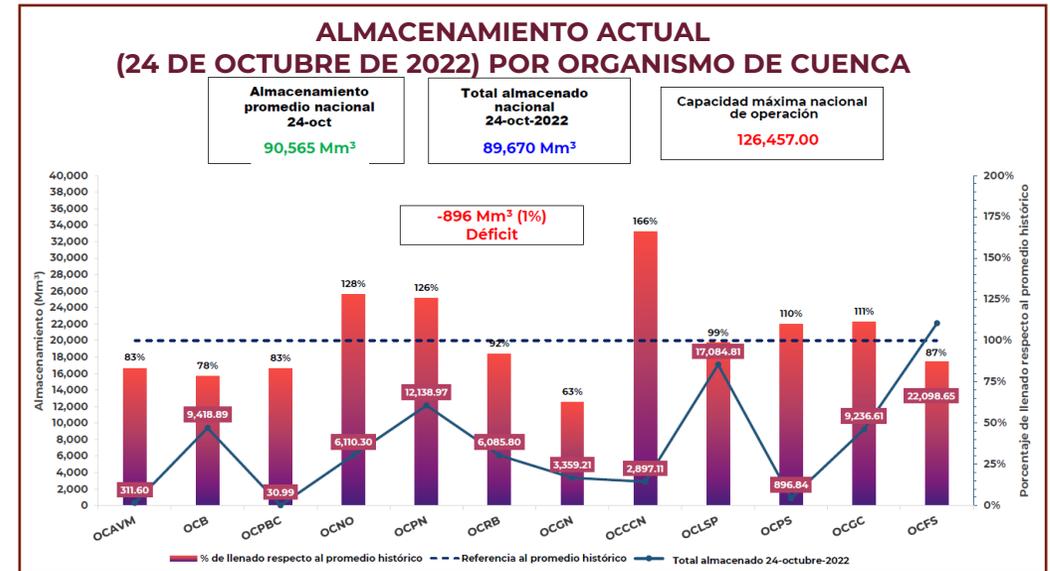
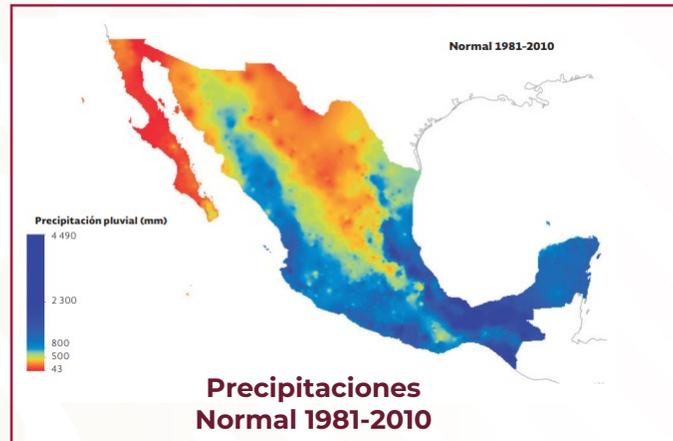
- El **periodo de retorno** de un evento hidrológico de magnitud dada, se define como el intervalo promedio de tiempo dentro del cual ese evento puede ser igualado o excedido una vez en promedio.
- Se le llama **periodo de retorno de diseño** cuando corresponde al periodo de retorno del evento de diseño con el cual se dimensionan las diversas estructuras de una obra.
- El **periodo de diseño**, que es el intervalo de tiempo en el cual se espera que una obra alcance su nivel de saturación o insuficiencia; este periodo debe ser menor a la vida útil de la misma.
- La **vida útil** es el tiempo en que la obra sirve adecuadamente a los propósitos de diseño, sin tener gastos elevados de operación y mantenimiento que hagan antieconómico su uso o requiera ser eliminada por insuficiente
- El **periodo económico de diseño** es el periodo de retorno de un evento de diseño para el cual se tiene la mejor relación costo - beneficio.

# Análisis estadístico y probabilístico en hidrología



➤ Con base en la historia de un fenómeno es posible estimar la magnitud de acuerdo a una probabilidad de ocurrencia. Por ello, se llevan a cabo mediciones periódicas de procesos hidrológicos entre los que se encuentran:

- La precipitación
- El escurrimiento en cauces naturales
- Volúmenes



Estos registros presentan variaciones en el espacio y en el tiempo, cuyo comportamiento es en parte predecible o determinístico y en parte aleatorio.



# Periodo de retorno



En Hidrología, normalmente se prefiere trabajar con periodos de retorno en lugar de probabilidades, pues es un concepto que resulta fácil de manejar ya que tiene las mismas unidades (tiempo) que la vida útil de la obra.

Por otra parte, cuando se analizan registros históricos de un fenómeno, se les asigna un periodo de retorno de acuerdo a la frecuencia de cada evento. Para calcularlo, es común suponer que la frecuencia o intervalo de recurrencia de cada evento del grupo es similar a la observada; por ello, se han propuesto varias fórmulas que permiten asignar un período de retorno a cada dato de la muestra en función de su frecuencia. Una de las más usuales es la fórmula de Weibull, la cual se escribe como

$$T_r = \frac{n + 1}{m}$$

donde  $m$  es el número de orden en una lista (de mayor a menor en el caso de máximos anuales), y  $n$  es el número de datos de la muestra.

# Determinación del Periodo de retorno



- La elección del periodo de retorno de diseño , influye en el **nivel de protección** y por consiguiente en la capacidad del sistema y **el riesgo o probabilidad de falla** de la obra.
- De análisis económicos, se ha observado que **el costo de una obra se incrementa en proporción al nivel de protección deseado** hasta cierto punto, a partir del cual, el costo de la obra crece demasiado sin tener mejoras sustanciales en el nivel de protección, a este punto se le denomina. Periodo económico de diseño.

## Asignación del periodo de retorno de diseño

- Cuando un sistema de drenaje pluvial se diseña para periodos de diseño mayores a 10 años, las obras resultantes son costosas, además, el sistema estaría funcionando la mayor parte de su vida útil muy por debajo de su capacidad. Por razones de economía, se ha propuesto usar periodos de retorno de diseño desde 1 hasta 10 años.
- En algunos casos es necesario considerar un periodo de retorno mayor ya que su falla podría dar lugar a:
  - Riesgo a la vida de los habitantes
  - Graves daños a la infraestructura local
  - Daños a las vías de acceso o de evacuación ante un fenómeno meteorológico

# Determinación del Periodo de retorno



Para la definición del periodo de retorno de los proyectos de obras hidráulicas se deberá optar por alguna de las siguientes dos opciones:

## 1. Utilizar la tabla para la definición del periodo de retorno, en esta definición prevalecerá el criterio de envolvente

Tipo de Obra Hidráulica	
DRENAJE PLUVIAL, se refiere a las tormentas de diseño	
Cunetas y contracunetas en:	
Caminos secundarios	2
Carreteras	5
Tramo de cruce a poblados	5-10
Aeropuertos y estaciones de ferrocarril y de autobuses	
Aeropuerto nacional	25
Aeropuerto internacional	50
<b>Estación de Ferrocarril</b>	<b>25</b>
Estación de autobuses	25
Zonas urbanas	
Asentamientos humanos pequeños con menos de 100 000 habitantes	5
Asentamientos humanos medianos entre 100 000 y 500 000 habitantes	10
Asentamientos humanos grandes con más de 500 000 habitantes	25-50
ESTRUCTURAS DE CRUCE A ZONA FEDERAL, se refiere a las crecientes de diseño	
<b>Puentes ferrocarrileros para el paso de corrientes visualizadas en el simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL)</b>	
<b>En vías locales aisladas (desvío)</b>	<b>50-100</b>
<b>En vías secundarias regionales</b>	<b>100-500</b>
<b>En vías primarias del país</b>	<b>500-1000</b>
<b>Cualquier tipo de vía localizada en una llanura de inundación en altiplanos o depresiones</b>	<b>100-500</b>
<b>Cualquier tipo de vía localizada en una llanura de inundación costera</b>	<b>500-1000</b>
Puentes para tuberías de abastecimiento industrial, productos y residuos de procesos industriales, incluyendo petróleo y gas	
Abastecimiento local	25-50
Abastecimiento regional	50-100
Abastecimiento primario	100-500



# Determinación del Periodo de retorno



OBRAS DE ALMACENAMIENTO Y CONTROL DE AVENIDAS, de abastecimiento a poblaciones, riego, energía, etc.				
Categoría	Almacenamiento (millones de m <sup>3</sup> )	Altura (m)	Pérdidas de vidas en caso de falla	Tr (años)
BORDO	Menor a 0.25	Menor a 15	0-10	100-500
			11-100	250- 1 000
			Más de 100	500 - 10 000
PRESA PEQUEÑA	entre 0.25 y 3	Menor a 15	0 - 10	1 000
			11 - 100	1 000 - 10 000
			Más de 100	10 000 o AMP
PRESA GRANDE	Mayor a 3	Mayor a 15	Evaluación conforme a NMX-AA-175-SCFI-2015	10 000 o AMP

AMP = Avenida máxima probable

# Determinación del Periodo de retorno



MEDIO AMBIENTE  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



CONAGUA  
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Para la definición del periodo de retorno de los proyectos de obras hidráulicas se deberá optar por alguna de las siguientes dos opciones:

**2. Llevar a cabo el estudio Costo-Beneficio para determinar el período de retorno Óptimo.**

**Dicho estudio deberá ser sometido a la aprobación de la Subdirección General Técnica de la Comisión Nacional del Agua.**

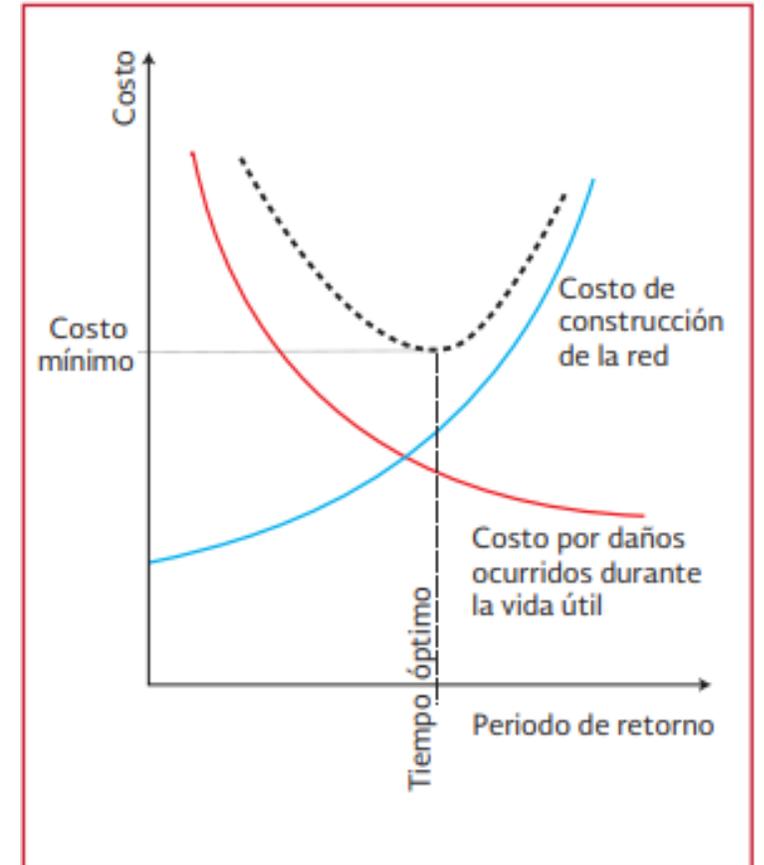


# Definición del Periodo de retorno



- Dado el carácter aleatorio de las lluvias y sus escurrimientos asociados, en la mayoría de los casos no es viable realizar obras de una magnitud tal que elimine totalmente el riesgo de inundación; por lo que es mejor diseñar la capacidad de la obra para que la **relación Costo – Beneficio sea adecuada**.
- Las condiciones y características para elegir un diseño u otro se deberían basar en un análisis de costo-beneficio, donde se comparen los costos de construcción contra los costos que provoca el fallo de la red de drenaje.
- En forma cualitativa puede decirse que conforme se incrementa la magnitud de la obra, se incrementa la protección proporcionada, pero también su costo.
- Por otro lado, conforme se incrementa la magnitud de la obra se reducen los daños esperados, por lo tanto **existe un tamaño óptimo de la obra para el cual la suma de los daños esperados por inundación más el costo de la protección (obra) es mínimo u óptimo**.

## Análisis costo-beneficio para el diseño de una red de drenaje



# Presas Madín

## Datos generales:

- **Año de construcción:** 1977
- **Río:** Tlalnepantla
- **Capacidad máxima de la obra de toma:**  
20.00 m<sup>3</sup>/s  
Potabilizadora de 0.50 m<sup>3</sup>/s
- **Obra de excedencias:**  
Vertedor controlado  
Capacidad de 210 m<sup>3</sup>/s  
Avenida de Diseño:  
**990 m<sup>3</sup>/s para Tr de 10,000 años.**

<b>NAME de diseño</b>	<b>2,346.04 msnm</b>	<b>24.7 hm<sup>3</sup></b>
-----------------------	----------------------	----------------------------

<b>NAMO de diseño</b>	<b>2,336.25 msnm</b>	<b>18.9 hm<sup>3</sup></b>
-----------------------	----------------------	----------------------------



# Presas Madín

Dada la capacidad limitada del cauce aguas abajo de la presa, se optó por reducir el NAMO a fin de contar con mayor volumen de regulación en el embalse evitando la operación del vertedor.

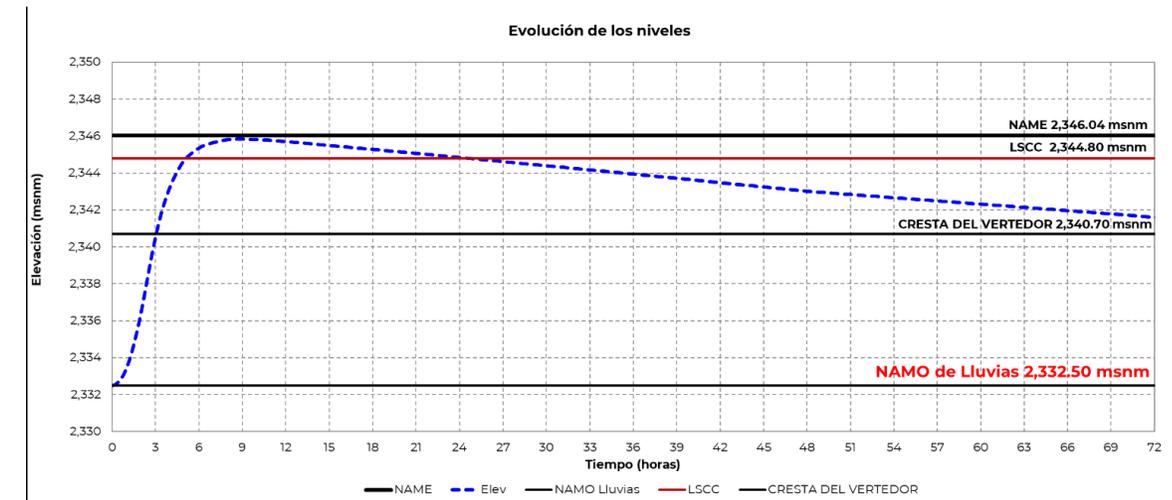
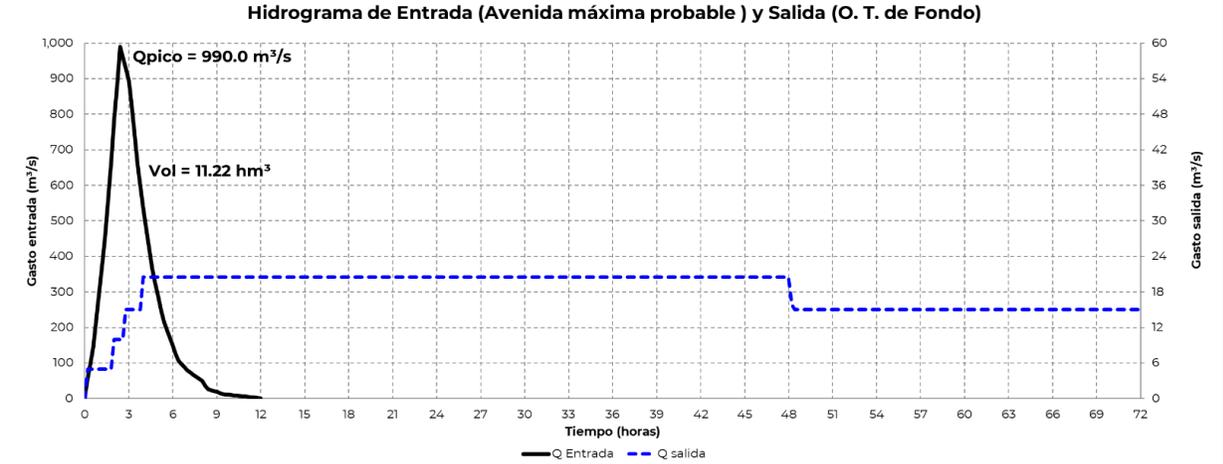
Capacidad del cauce aguas abajo (1979)

20 m<sup>3</sup>/s

Avenida Revisada

990 m<sup>3</sup>/s para Tr de 10,000 años.

## Tránsito de la avenida en condiciones de descarga libre, por OT



**NAMO de diseño**

**2,336.25 msnm**

**18.9 hm<sup>3</sup>**



**NAMO revisado**

**2,332.50 msnm**

**12.35 hm<sup>3</sup>**



# Presas Madín

Sin embargo, debido a la cantidad de azolves en el embalse de la presa y el incremento de la población aguas abajo del río Tlalnepantla, actualmente solo es posible transitar la avenida con periodo de retorno de 4,000 años, durante la temporada de lluvias.

Capacidad del cauce aguas abajo (2021)

10 m<sup>3</sup>/s

Avenida con Tr 4,000 años

894 m<sup>3</sup>/s

**NAMO de diseño**      **2,336.25 msnm**      **18.9 hm<sup>3</sup>**

**NAMO Lluvias**      **2,332.50 msnm**      **7.13 hm<sup>3</sup>**

(15 mayo – 30 septiembre)

Transición estiaje 01 al 31 de octubre

Urbanización en Madín, 1989 - 2021



# Presa Madín

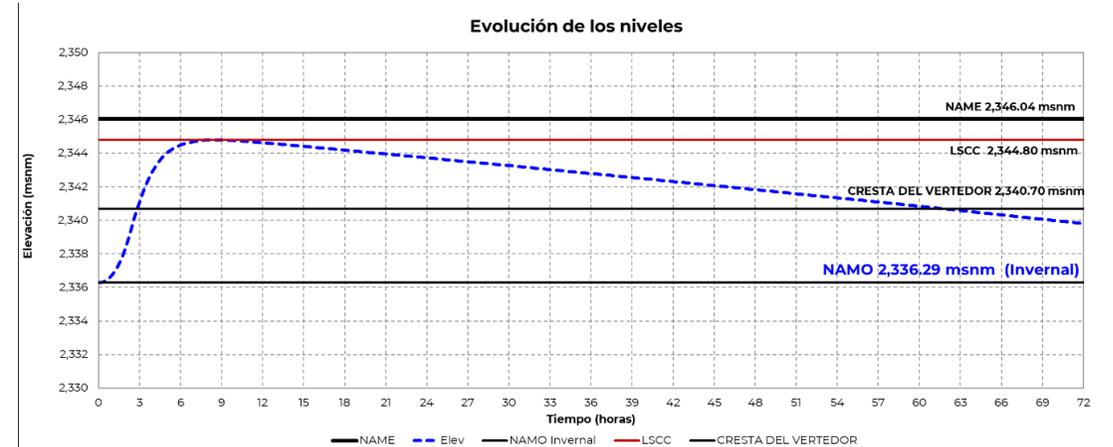
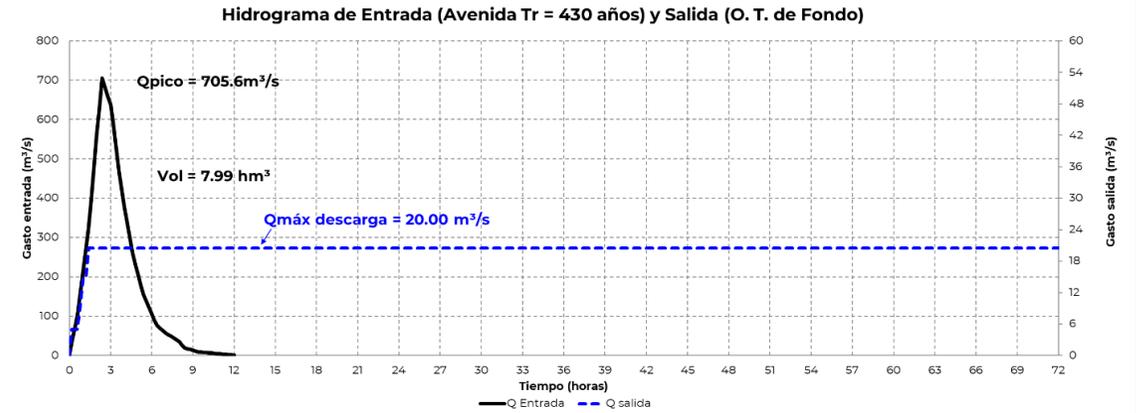
Durante la temporada de estiaje, la avenida que puede ser regulada a partir del NAMO correspondiente, tiene un caudal pico de 705 m<sup>3</sup>/s, con Tr de 430 años

Capacidad del cauce aguas abajo

10 m<sup>3</sup>/s

Avenida con Tr 430 años

705 m<sup>3</sup>/s



**NAMO de diseño**

**2,336.25 msnm**

**18.9 hm<sup>3</sup>**

**NAMO Estiaje**

**2,336.29 msnm**

**9.37 hm<sup>3</sup>**

(01 noviembre – 31 marzo)

Transición a lluvias 1 abril – 14 mayo

**NAMO Lluvias**

**2,332.50 msnm**

**7.13 hm<sup>3</sup>**

(15 mayo – 30 septiembre)

Transición estiaje 01 al 31 de octubre



# Ciclones tropicales

## Huracán Willa, 2018

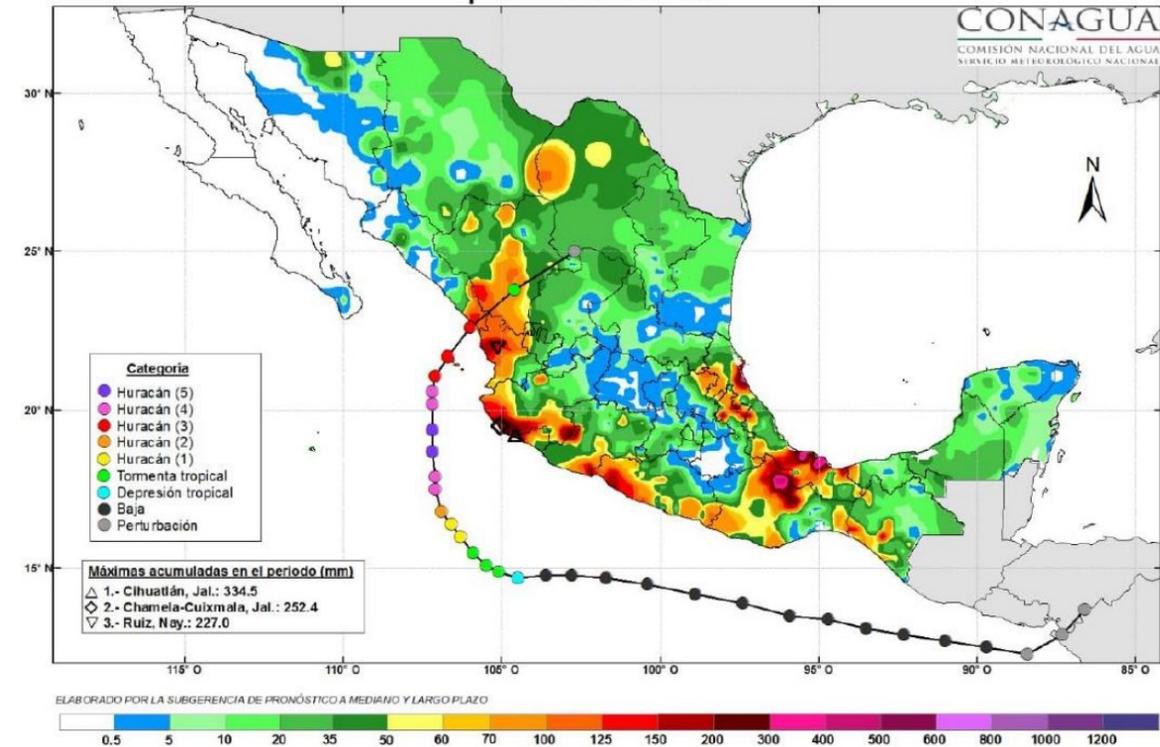


MEDIO AMBIENTE  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



- El día 20 de octubre de 2018, cuando se encontraba a 490 km al sur-suroeste de Manzanillo, se desarrolló la tormenta tropical con el nombre de “WILLA”
- El día 22 de octubre “WILLA” alcanzó la categoría 5 en la escala Saffir-Simpson
- Tocó tierra en las costas de Sinaloa el 23 de octubre como huracán de categoría 3.
- Los mayores registros de precipitaciones se presentaron en las estaciones Higuera Blanca, Jal. (198 mm) el 22 de octubre; estación Ruiz, Nay. (184 mm) el 23 de octubre; y en Rosarito, Sin. (52 mm) el 24 de octubre.

Precipitación acumulada (mm) del 19 al 24 de octubre de 2018  
por el huracán Willa



# Ciclones tropicales

## Huracán Willa, 2018

- 8 de los 20 municipios del Estado de Nayarit resultaron afectados
- Más de 180 mil damnificados
- Las principales afectaciones registradas en infraestructura del sector de comunicaciones y transporte fueron:
  - Cruce de agua
  - Derrumbes
  - Deslaves
  - Colapso de tres puentes y uno con daños severos
  - Destrucción de la superficie de rodamiento y debilitamiento de los hombros en autopistas, carreteras y ramales del norte de Nayarit.

### Río Baluarte

Inundación en 5 localidades del municipio El Rosario, además socavó los empotramientos del nuevo puente que comunica a dichas comunidades con la cabecera municipal.



### Río Acaponeta

Se presentaron afectaciones en Loma Bonita, Infonavit, San José de Gracia, Jardín, Chumacero, Terrón Blanco, Camichín, Centenario, Mazatlancito y la calle Chapultepec a la altura del puente amarillo



# Gastos de diseño en presas

## Presas Venustiano Carranza



MEDIO AMBIENTE  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



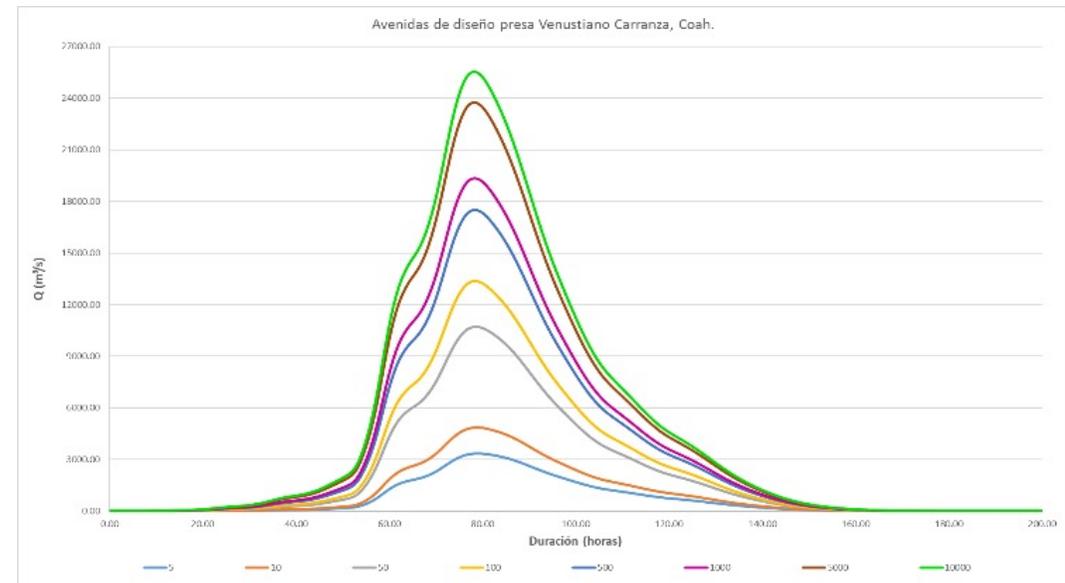
CONAGUA  
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Localizada sobre el río Salado en el estado de Coahuila

Año de construcción: **1930**

Gasto de diseño: **19,432 m<sup>3</sup>/s**

Periodo de retorno: **10,000 años**



Considerando las avenidas de diseño actualizadas, se puede observar que el gasto de diseño utilizado para la construcción de la presa, actualmente **corresponde a un periodo de retorno de 1,000 años.**



# Gastos de diseño en presas



MEDIO AMBIENTE  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



## Presa Marte R. Gómez

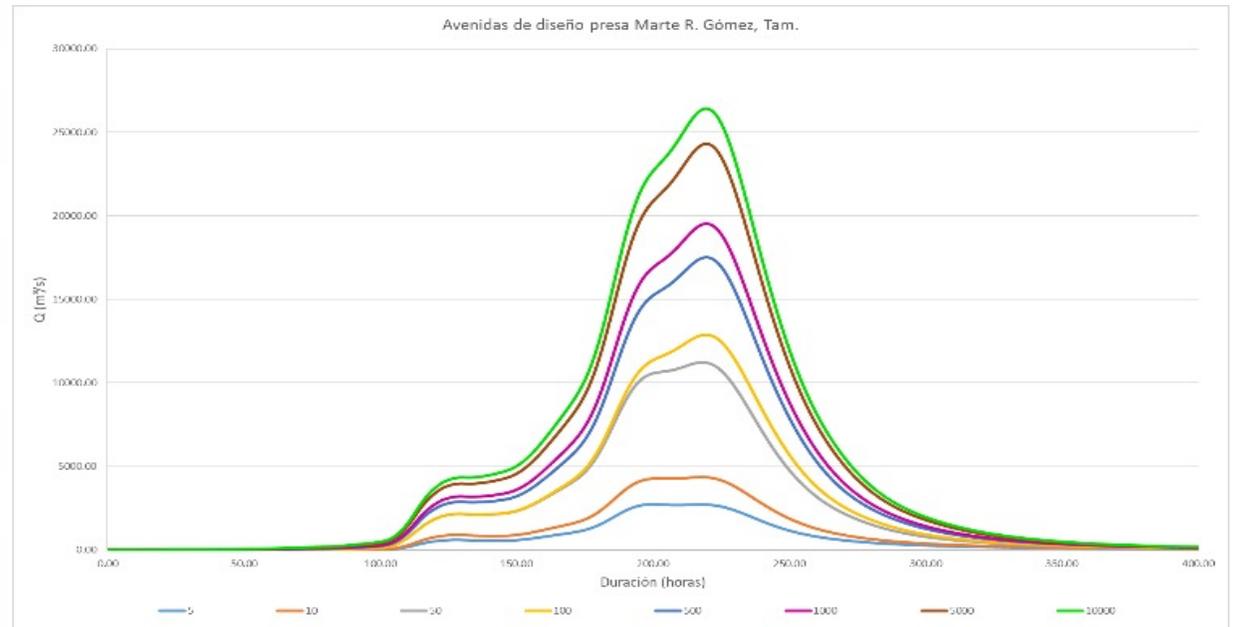


Localizada sobre el río San Juan en el estado de Tamaulipas

Año de construcción: **1946**

Gasto de diseño: **21,000 m<sup>3</sup>/s**

Periodo de retorno: **10,000 años**



Actualmente el gasto de diseño con el cual se construyó la presa Marte R. Gómez, **corresponde a un periodo de retorno de 2,200 años.**



- Bajo varios escenarios de calentamiento global, se espera que cambien los patrones climatológicos. Algunas regiones se secarán, mientras que otras se volverán más húmedas. **Todo el registro de precipitaciones podría estar en riesgo de obsolescencia.** Es probable que un diseño existente o planificado, basado en el registro disponible, se vuelva menos conservador bajo un cambio de húmedo a árido, debido a un aumento en la intensidad de la lluvia, o de árido a húmedo, debido a un aumento en la altura de lluvia (Ponce, 2008. *On the return period to be used for design*).
- La práctica actual que usa métodos probabilísticos aplicados para diseñar estructuras hidráulicas generalmente asume que los eventos extremos son estacionarios (Salas y Obeysekera, 2014. *Revisiting the Concepts of Return Period and Risk for Nonstationary Hydrologic Extreme Events*).
- De acuerdo con Salas y Obeysekera (2014) se ha demostrado que el período de retorno y las estimaciones de riesgo para situaciones no estacionarias pueden ser bastante diferentes a las correspondientes a condiciones estacionarias.

- Slater, L., et al. (2021, *Global changes in 20-year, 50-year, and 100-year river floods*) considerando análisis no estacionarios, han encontrado que para los períodos de retorno de 20 y 50 años, incrementan mayormente las crecidas de ríos en zonas de clima templado, pero decrecen en zonas de clima árido, tropical, polar y frío. Para los períodos de retorno de 100 años, obtuvieron resultados ligeramente diferentes, con disminuciones en las zonas áridas y templadas; tendencias mixtas en zonas frías; y aumentos en una pequeña muestra de sitios tropicales.