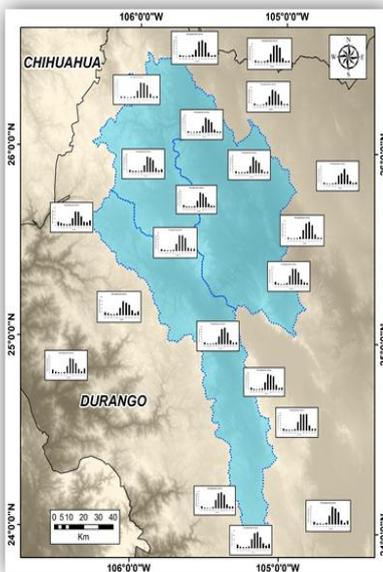
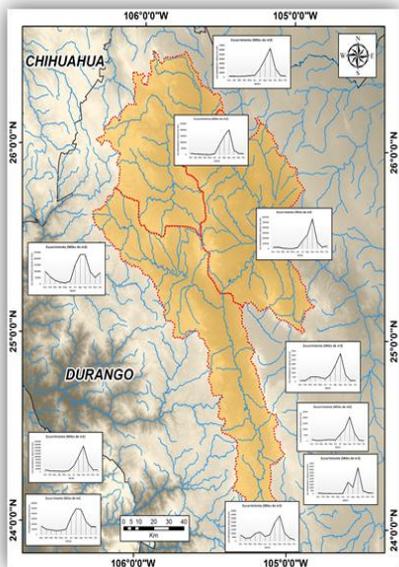


EL MONZÓN DE NORTEAMÉRICA Y SU INFLUENCIA EN LA VARIABILIDAD HIDRO CLIMÁTICA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO NAZAS

JOSÉ VILLANUEVA DÍAZ, JUAN ESTRADA ÁVALOS,
ALDO RAFAEL MARTÍNEZ SIFUENTES



DIRECTORIO INSTITUCIONAL

SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN

M.C. José Eduardo Calzada Rovirosa
Secretario

C.P. Jorge Armando Narváez Narváez
Subsecretario de Agricultura

M.C. Mely Romero Celis
Subsecretario de Desarrollo Rural

Lic. Ricardo Aguilar Castillo
Subsecretario de Alimentación y Competitividad

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

Dr. Rafael Ambriz Cervantes
Encargado del Despacho de los Asuntos Correspondientes a la Dirección General del INIFAP

Dr. Raul Gerardo Obando Rodríguez
Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación

M.C. Jorge Fajardo Guel
Coordinador de Planeación y Desarrollo

M.A. Eduardo Francisco Berterame Barquin
Coordinador de Administración y Sistemas

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA EN RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA

Dr. Juan Estrada Ávalos
Director del CENID

**Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y
Pecuarias**

**Avenida Progreso No. 5
Barrio de Santa Catarina
Delegación Coyoacán
C.P. 04010, México, D.F.
Teléfono (55) 3871 – 8700**

ISBN: 978-607-37-0836-4

Primera edición 2017

**No está permitida la reproducción total de esta publicación, ni la
transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea
electrónico, mecánico, fotocopia u otros métodos, sin el permiso
previo y por escrito de la institución.**

**EL MONZÓN DE NORTEAMÉRICA Y SU INFLUENCIA EN
LA VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA DE LA CUENCA
ALTA DEL RÍO NAZAS**

**Dr. José Villanueva Díaz
Dr. Juan Estrada Ávalos
M.C. Aldo Rafael Martínez Sifuentes**

CONTENIDO

Introducción.....	1
Descripción del sistema monzónico.....	2
El Monzón de Norteamérica.....	4
Evolución histórica del fenómeno del monzón.....	5
Mecánica climática del Monzón de Norteamérica.....	6
Influencia histórica de NAMS en la precipitación y escurrimiento en cuencas con origen en la Sierra Madre Occidental.....	9
El Monzón de Norteamérica y la disponibilidad hídrica.....	10
Importancia de NAMS en la producción de agua de la cuenca del río Nazas.....	11
Reconstrucción histórica de escurrimientos en la cuenca del río Nazas.....	14
Conclusiones.....	16
Literatura citada.....	18
Agradecimientos.....	23

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Comportamiento del monzón de verano y su interacción con los componentes que lo generan (izquierda) y el comportamiento del monzón de invierno (derecha). Fuente: Young et al., 2014.....	3
Figura 2	Procesos físicos en los océanos pacífico y Atlántico que determinan el comportamiento del Monzón de Norte América, mediante la generación de flujos de humedad de niveles atmosféricos bajo y medio, influenciados por la posición de la zona de convergencia intertropical y por los centros de alta presión en el Pacífico (APN) y Atlántico (AB). Fuente: Metcalfe et al. 2015.....	7
Figura 3	Diagrama esquemático del comportamiento de NAMS, donde las corrientes de chorro de nivel bajo (CCB) en ambos océanos acarrean vapor de agua hacia el continente y finalmente dando pie a precipitaciones copiosas durante el verano en las partes altas de la Sierra Madre Occidental. Fuente: Metcalfe et al. 2015.....	8
Figura 4	Distribución de series dendrocronológicas en cunecas importantes (Nazas, lado izquierdo y Conchos, lado derecho) que tienen su origen en la Sierra Madre Occidental.....	10
Figura 5	Distribución de la precipitación en algunas estaciones climáticas distribuidas en la cuenca del río Nazas, donde se evidencia el período lluvioso Junio-Septiembre, lapso donde ocurre cerca del 80% de la precipitación anual. Esta cuenca se encuentra enclavada en la SMO con drenaje hacia la vertiente oriental.....	12
Figura 6	Distribución de estaciones hidrométricas dentro de la cuenca del río Nazas y en cuencas circunvecinas. Se observa que los mayores volúmenes de escurrimiento (aproximadamente 90%) ocurren en el período Junio-Octubre, los cuales derivan de las lluvias que se presentan durante el verano como consecuencia de la influencia de NAMS.....	13
Figura 7	Reconstrucción de las entradas anuales con anillos de crecimiento de especies arbóreas a la presa de almacenamiento “Lázaro Cárdenas”, que capta todos los escurrimientos producidos en las partes al alta y media de la cuenca del río Nazas. La línea horizontal punteada corresponde al escurrimiento medio reconstruido; la línea en gris corresponde a los valores de entradas anuales y la línea flexible oscura es una curva suavizada decenal para resaltar períodos secos y húmedos. Los períodos con menor escurrimiento se presentaron de 1760 a 1775 (16 años), 1818 a 1830 (13 años) y de 1949 a 1963 (15 años).....	16
Figura 8	Condiciones hidroclimáticas dominantes en México en el período 1949-1963. Se observa la dominancia de condiciones muy secas en el norte-centro de México (valores negativos en color rojo y amarillo) y húmedas en el sur (azul cielo). En este período, se tuvo un debilitamiento de NAMS. La sequía de la década de 1950-1960, favoreció el fenómeno social conocido como “ <i>bracerismo</i> ” hacia los EUA (Florescano, 1980).....	16

EL MONZÓN DE NORTEAMÉRICA Y SU INFLUENCIA EN LA VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO NAZAS

José Villanueva Díaz¹

Juan Estrada Ávalos¹

Aldo Rafael Martínez Sifuentes²

Introducción

La variabilidad natural del clima a escala anual e interanual, que ha sido exacerbada por las actividades antropogénicas, al contribuir con un mayor aporte a la atmósfera de gases efecto invernadero. Entre los efectos más evidentes se han documentado ampliamente sobre el calentamiento global, el desfase de los ciclos de producción y la reducción de la temporada de crecimiento de los cultivos. El desbalance en los ciclos vitales del planeta (hídrico, energía y del carbono) es la consecuencia asociada a la variabilidad climática. Esto es la liberación excesiva de gases efecto invernadero derivado de la quema de combustibles fósiles y liberación de otros gases, a consecuencia de actividades agropecuarias e industriales y que poseen mayor capacidad de calentamiento; así como por cambios drásticos en la cobertura vegetal, provocados por deforestación, ampliación de la frontera agrícola, incendios intencionales, urbanización y otras acciones de disturbio, han modificado el comportamiento natural del clima y provocado la presencia cada vez más frecuente de eventos hidroclimáticos extremos, que se manifiestan en sequías más frecuentes y de mayor extensión e intensidad, inundaciones, tornados, surgencias entre otros eventos climáticos, que ocasionan daños cuantiosos a la población en términos sociales y económicos (IPCC, 2014).

El norte de México es una de las regiones más interesantes desde la perspectiva climática por sus posición geográfica, orografía y continuidad en el espacio geográfico. El clima, su expresión y dinamismo, está fuertemente influenciado por dos sistemas montañosos Sierras Madre Occidental y

¹Investigador INIFAP CENID-RASPA

²Asistente de investigación INIFAP CENID-RASPA

Oriental e influye de manera directa en la integración de comunidades bióticas, extensión espacial del uso de suelo, en la disposición de los servicios ambientales y en la distribución de los recursos del ecosistema. La dominancia de condiciones semiáridas, donde la disponibilidad hídrica es el factor que más limita el desarrollo social y económico regional y donde el clima está influenciado por diversos fenómenos climáticos de circulación general, donde algunos de ellos, como son el Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) y el Monzón de Norteamérica, frentes fríos y tormentas de origen tropical y de convección, explican el comportamiento de la precipitación, donde los mayores volúmenes se presentan durante la estación de verano y donde el fenómeno del Monzón juega un papel preponderante en la precipitación de dicho período; en particular, en cuencas que tienen su origen en la Sierra Madre Occidental (SMO) y que drenan tanto hacia la Planicie Costera del Océano Pacífico en su vertiente occidental como hacia la Altiplanicie del Desierto Chihuahuense en su vertiente oriental (Gochis *et al.*, 2006).

Dado que gran parte de la precipitación anual en esta región, que se presenta en el período Junio-Septiembre, constituye más del 75% de la lluvia total anual, la cual genera hasta el 90% de los escurrimientos, los cuales son captados en presas de almacenamiento y de liberación, justifica plenamente el entendimiento de los fenómenos climáticos de tipo monzónico como es el Monzón de Norteamérica, fenómeno cuyo comportamiento, se describe en el presente documento y que es soportado con información científica publicada sobre el comportamiento físico del fenómeno, por reconstrucciones de precipitación y de volúmenes de escurrimiento generados con anillos de crecimiento de especies arbóreas, que se distribuyen en las principales cuencas productoras de agua de la Sierra Madre Occidental, como es el caso de la cuenca del río Nazas y otras cuencas aledañas.

Descripción del sistema monzónico

El término "*monzón*" se deriva de la palabra árabe "*mausim*" que significa "*estación*". Éste término fue acuñado hace varios siglos

por los comerciantes marinos que navegaban el Océano Índico y el Mar Árabe, a través del cual, hacían referencia a un cambio marcado en la dirección de los vientos dominantes, ya que, durante el invierno, procedían del noreste, mientras que, en el verano, mostraban un cambio de dirección, es decir, el suroeste (NOAA, 2006).

Hoy en día, se sabe, que los vientos de superficie son los que mayormente determinan éste fenómeno atmosférico, caracterizado por un cambio estacional inverso de un gradiente de temperatura, asociado con el calentamiento de la masa continental durante el verano, desarrollo de un sistema superficial de baja presión aunado a un sistema de alta presión con movimiento anticiclónico, que se ubica en la parte más extrema del sistema y a mayores latitudes (Hyung *et al.*, 2008).

A nivel global, existen ocho regiones, principalmente tropicales, que presentan este fenómeno, tales como India, Pacífico Norte Occidental, Asia Oriental, Australia, Norteamérica, Sudamérica, Norte y sur de África. Aunque algunos de ellos suelen interactuar, como el monzón de Asia Oriental y el Pacífico Norte con el de Norteamérica, todos presentan condiciones o características muy peculiares (Young *et al.*, 2014).

Se conoce dos tipos de sistemas, el de verano y el de invierno (Figura 1). La importancia de los sistemas monzónicos de verano, va más allá de la inversión estacional de los vientos predominantes, ya que estos cambios en su dirección, traen consigo precipitaciones copiosas en las zonas continentales, debido al traslado de masas de aire húmedo (vapor de agua) procedentes de los océanos, que finalmente se condensan y precipitan sobre la superficie terrestre. Estas regiones, se caracterizan por un fuerte contraste entre un verano lluvioso y un invierno seco. Mientras que, en los sistemas monzónicos de invierno, la precipitación ocurre principalmente en los océanos (Young *et al.*, 2014).

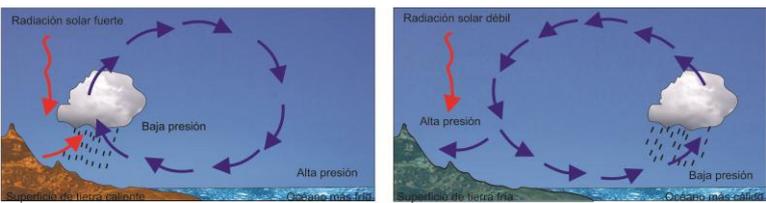


Figura 1. Comportamiento del monzón de verano y su interacción con los componentes que lo generan (izquierda) y el comportamiento del monzón de invierno (derecha). Fuente: Young *et al.*, 2014.

El Monzón de Norteamérica

Este sistema monzónico, ha sido estudiado desde hace varias décadas y aunque ha sido nombrado de diferentes maneras, tales como “Monzón del Suroeste de los Estados Unidos”, “Monzón Mexicano”, “Monzón de Arizona”, “Monzón de verano del Suroeste de Estados Unidos” o “Monzón del Suroeste de Norteamérica”. En términos geográficos su zona de se extiende desde el noroeste de México, principalmente los estados contiguos al Océano Pacífico y el Golfo de California, hasta el suroeste de los Estados Unidos de América, abarcando el sur del estado de Arizona y parte de los estados de Nuevo México y Texas (Douglas *et al.*, 1993; Gochis *et al.*, 2006).

Éste fenómeno regional, catalogado como el promotor de las lluvias de verano (Ropelewski *et al.*, 2005), es de relevancia, ya que determina la extensión del ciclo y la intensidad de lluvias proporcionando la mayor cantidad de humedad anual y por ende, de los escurrimientos superficiales y subsuperficiales en su zona de influencia, que involucra gran parte de la SMO, particularmente aquellos sitios ubicados en la vertiente occidental de este sistema montañoso y en las cuencas con mayor elevación que en ella se ubican; no obstante que, su influencia también se deja sentir en la vertiente oriental de dicho sistema montañoso (Descroix *et al.*, 2002; Gochis *et al.*, 2006), donde determina la producción de volúmenes de escurrimiento de cuencas hidrológicas que drenan hacia la altiplanicie del desierto Chihuahuense. Aproximadamente el 70% del total de la precipitación registrada en ésta región, se atribuye a este fenómeno meteorológico, aunque en algunos sitios puede llegar hasta el 80% (Vivoni *et al.*, 2008).

Evolución histórica del fenómeno del Monzón

La evidencia del fenómeno del monzón, se remonta a varios miles de años en el pasado y su prevalencia se ha determinado mediante el análisis de la variación en su comportamiento a través de estudios fundamentados en registros “*proxys*” procedentes del océano y del continente; así como con la aplicación de modelos climáticos, que abarcan desde el período conocido como “*Younger Dryas*” o “*Dryas reciente*” (12,700 y 11,500 años antes del presente) hasta hace aproximadamente 4,000 años, que se considera a grandes rasgos como la mitad del período Holoceno, que inició hace 10,000 años y se extiende hasta el presente (Metcalf *et al.*, 2015). Las condiciones durante la etapa del “*Dryas reciente*” se caracterizaron por ser frías y húmedas en la parte norte, y más secas en el sur; mientras que a mediados del Holoceno fueron más húmedas en el sur que en el norte. La variación en el comportamiento del fenómeno NAMS, tal como se presenta en la actualidad, sugiere que su tendencia inició hace aproximadamente 6,000 años, alcanzando la máxima variabilidad hace 4,000 años, situación atribuida a un desplazamiento hacia el sur del centro de alta presión denominado “*Bermuda High*” o “*Alto Bermuda*” debido a un decremento en la influencia de fenómenos climáticos de impacto global. Tal como el retraimiento de la capa de hielo “*Laurentide*”, que durante la “*Edad de Hielo*”, cubrió gran parte de Canadá y norte de los Estados Unidos de América. La variación de NAMS en los últimos 2,000 años se ha atribuido a impactos diferenciales de fenómenos de circulación general, donde episodios intensos de NAMS se relacionan con una condición similar a ENSO en su fase fría (Niña) y condición negativa de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO); mientras que condiciones débiles de NAMS relacionadas con sequías, se asocian a condiciones de alta presión en la faja subtropical del Atlántico norte y a un debilitamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI) en la parte este del Pacífico tropical (Metcalf *et al.*, 2015; Lachniet *et al.*, 2017).

Estudios recientes, en los que se modela el incremento en la concentración de gases efecto invernadero bajo el modelo de emisiones RCP 8.5 (Moss *et al.*, 2010), indican que la modelación de estos gases tiene mínima influencia en los volúmenes de

precipitación que se presentan en la zona de influencia de NAMS, aunque el modelo si indica un cambio significativo en el período de inicio del monzón y un desfase en el período de su finalización. Este comportamiento, aunque en teoría no afecta la cantidad de lluvia, si es de consideración, ya que su desfase puede tener consecuencias significativas en aspectos sociales y ecológicos (Cook y Seager, 2013). En términos sociales, puede impactar la producción de alimentos, volúmenes de escurrimiento superficial y por ende en la recarga del manto freático, con efectos en la producción agropecuaria y en términos ecológicos incide sobre la producción de forraje afectando la práctica de ganadería extensiva y la dinámica de especies vegetales que evolucionaron con la disponibilidad hídrica y distribución en el tiempo de la lluvia de verano, determinada por este fenómeno atmosférico, así como los gradientes estacionales de temperatura y humedad del suelo (Englehart y Douglas, 2005; Ray *et al.*, 2007).

Mecánica climática del Monzón de Norteamérica

El comportamiento de NAMS se explica por una respuesta física derivada de las diferencias entre la temperatura superficial de la corteza terrestre y del océano, ambas influenciadas por el proceso de radiación solar. Esta diferencia en temperatura, provoca cambios drásticos en la presión atmosférica, que da paso a movimientos de los vientos húmedos dominantes, en este caso, del océano hacia el continente (Young *et al.*, 2014).

En términos descriptivos, este proceso se caracteriza por el movimiento de un flujo de humedad a elevaciones bajas procedentes de los golfos de California y de México, movimiento que es restringido por los sistemas montañosos SMO y SMOR; por otra parte, el desplazamiento del ZCI hacia el norte, favorece la entrada de flujos de humedad al continente procedentes del océano Pacífico. Los sistemas de alta presión en la porción Norte del Pacífico (APN) y Alto Bermuda (AB), restringen el flujo de humedad tropical. No obstante, que el mayor suministro de humedad durante la influencia de NAMS procede del este del océano Pacífico tropical, los vientos húmedos de niveles medios que tienen su origen en el Golfo de México, proporcionan aporte adicional de humedad de verano en México,

así como en la porción más al norte de la influencia de este sistema monzónico (Reyes *et al.*, 1994; Lachniet *et al.*, 2017). La región afectada por NAMS está limitada al este por el Océano Atlántico y Golfo de México y al oeste por el Océano Pacífico y Golfo de California (componentes oceánicos). Al interior, comprende grandes mesetas continentales como la meseta de Colorado y el altiplano mexicano (componente terrestre), donde se ubican los desiertos sonorenses y chihuahuenses (Adams y Comrie, 1997).

La temperatura de la superficie del mar (TSM) en verano (julio, agosto y septiembre), en latitudes medias y subtropicales a lo largo de la costa del océano Pacífico y en el Pacífico norte, en promedio son generalmente frías ($<25\text{ }^{\circ}\text{C}$), mientras que las TSM en el Golfo de California y el Océano Pacífico Tropical son cálidas ($>28\text{ }^{\circ}\text{C}$). Del mismo modo, la TSM del Golfo de México es cálida ($>26\text{ }^{\circ}\text{C}$). Por su parte, la zona continental (componente terrestre) está caracterizada por altas temperaturas derivadas de un alto flujo radiante (Reyes *et al.*, 1994) (Figura 2).

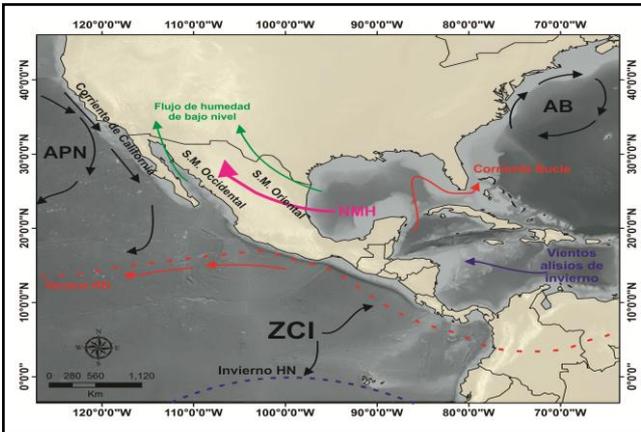


Figura 2. Procesos físicos en los océanos Pacífico y Atlántico que determinan el comportamiento del Monzón de Norte América, mediante la generación de flujos de humedad de niveles atmosféricos bajo y medio, influenciados por la posición de la zona de convergencia intertropical (ZCI) y por los centros de alta presión en el Pacífico (APN) y Atlántico (AB). Fuente: Metcalfe *et al.* 2015.

La temperatura cálida en el Golfo de California, Océano Pacífico y Golfo de México, favorecen la evaporación del agua y la formación de nubes. Mientras tanto, la temperatura fría de las regiones media y subtropical del Océano Pacífico y del Pacífico Norte, permiten la generación de zonas de alta presión atmosférica. Por su parte, la alta temperatura de la zona continental forma centros de baja presión atmosférica. Diferencias de presión atmosférica originan que los vientos se desplacen de zonas de alta presión a zonas de baja presión. En éste sentido, vientos procedentes de regiones medias, subtropicales y norte del Océano Pacífico, trasladan masas de aire húmedo (vapor de agua) en forma de brizas hacia la zona continental. Del mismo modo, ocurre con los vientos que son generados en zonas frías del Océano Atlántico, los cuales transportan aire húmedo del golfo de México, aunque en menor cantidad hacia la zona continental (Figura 3) Finalmente, éste vapor de agua se condensa y precipita sobre la superficie terrestre, dando origen a una circulación tipo monzónico (Higgins *et al.*, 1997).

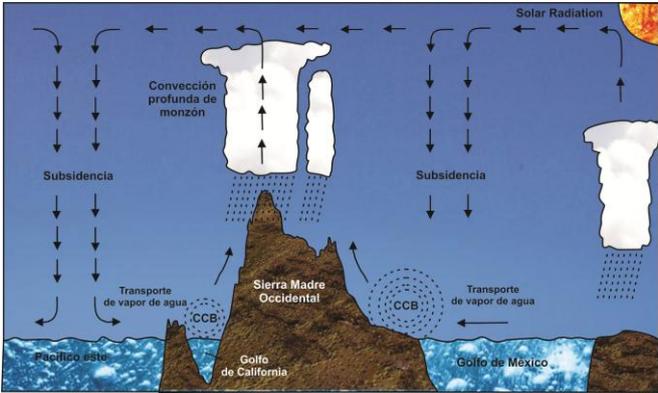


Figura 3. Diagrama esquemático del comportamiento de NAMS, donde las corrientes de chorro de nivel bajo (CCB) en ambos océanos acarrearán vapor de agua hacia el continente y finalmente dando pie a precipitaciones copiosas durante el verano en las partes altas de la Sierra Madre Occidental. Fuente: Metcalfe *et al.* 2015.

Influencia histórica de NAMS en la precipitación y escurrimiento en cuencas con origen en la Sierra Madre Occidental

El uso de registros de precipitación y de escurrimientos de estaciones climáticas e hidrométricas ubicadas en el área de influencia de NAMS en México, es una de las formas más comunes para evidenciar el impacto que este patrón de circulación, tiene su mayor influencia en la estación de verano; el uso de estos registros, sin embargo, tiene la limitante de la extensión de los registros, que generalmente son cortos (<70 años de extensión) y con problemas de calidad (datos faltantes, erróneos y con cambios de ubicación de las estaciones). A pesar de lo anterior, gran parte del entendimiento físico del fenómeno de NAMS se ha derivado con base a estos registros y las fechas de inicio del ciclo de lluvias y el volumen de precipitación se han utilizado para obtener índices, que relacionan la superficie del agua del mar, influencia de fenómenos circulatorios y variabilidad del comportamiento del monzón en términos de precipitación (Higgins *et al.*, 1999; Comrie y Glenn, 1998; Turrent y Cavazos, 2009).

El análisis de la influencia histórica de NAMS sobre la variabilidad climática en períodos más allá de los registros instrumentales, se ha determinado con “*proxys*” climáticos. Uno de éstos son los anillos de los árboles, en los que el grosor de la banda de madera tardía del anillo anual de crecimiento de muchas especies de coníferas y de latifoliadas (hoja ancha) es evidencia de la cantidad de lluvia ocurrida en la estación de verano (Griffin *et al.*, 2011). Para utilizar series de madera tardía, sus valores deben ser independientes. Es decir, que no exista influencia del crecimiento de la madera temprana en el grosor de la madera tardía. Para determinar esta independencia existen una serie de procedimientos, uno de los cuales es el propuesto por Meko y Baisan (2001), que minimiza la correlación existente entre ambas bandas y a los índices resultantes se les conoce como madera tardía ajustada o madera tardía pura (Stahle *et al.*, 2009).

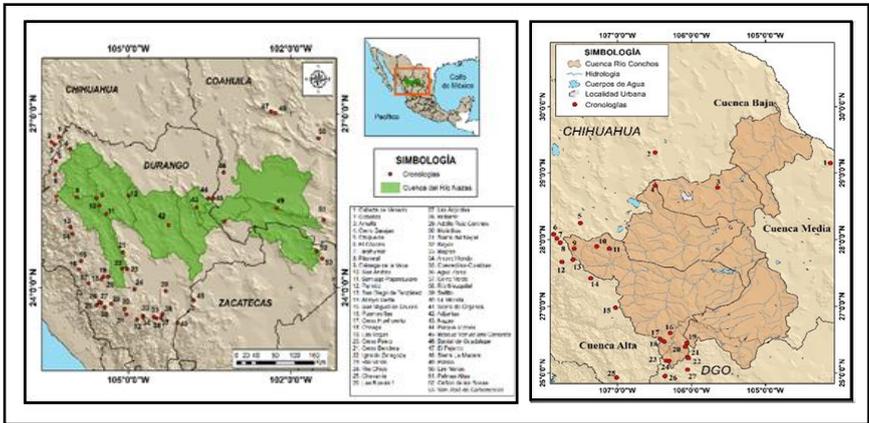


Figura 4. Distribución de series dendrocronológicas en cuencas importantes (Nazas, lado izquierdo y Conchos, lado derecho) que tienen su origen en la Sierra Madre Occidental.

Reconstrucciones de NAMS para el suroeste de los Estados Unidos de América, se han realizado por cerca de 500 años mediante series de crecimiento de madera tardía (Griffin *et al.*, 2013), en particular para la región 2 de NAMS, que comprende la región suroeste de los EUA. En México, aunque se ha desarrollado una red dendrocronológica muy completa para el área de mayor impacto de NAMS (Figura 4), la gran mayoría de las series dendrocronológicas muestran influencia de la precipitación acumulada estacional invierno-primavera y la respuesta climática en series de madera tardía no ha sido analizada del todo y aún falta realizar el ajuste de la madera tardía para disminuir su asociación con la madera temprana y estar en la posibilidad de realizar este tipo de reconstrucciones..

El Monzón de Norteamérica y la disponibilidad hídrica

El Monzón de Norteamérica tiene su origen en la costa sur de México y se mueve de manera gradual de sur a norte, entre los meses de junio y julio. La presencia de lluvias intensas a principios de junio sobre la región costera de México, principalmente en los estados de Jalisco y Colima, señalan la

llegada de éste fenómeno, el cual de manera paulatina asciende en latitud hasta alcanzar el flanco occidental de la SMO para continuar su desplazamiento hasta alcanzar los estados de Arizona y Nuevo México, E.U.A., a principios de julio (Watts *et al.*, 2007).

No obstante que este sistema monzónico tiene efectos significativos en la precipitación de verano del noroeste de México y suroeste de los EUA, el mayor beneficio se centra en la vertiente occidental de la SMO que abarca parte de los estados de Sinaloa, Durango, Chihuahua y Sonora. Por la cantidad de lluvia que se presenta en ésta región, NAMS cobra mayor relevancia, ya que existe una relación positiva entre la precipitación y los volúmenes de escurrimiento que reciben las presas de dicha región, que puede ser en el rango de 50 a 90% y que finalmente, constituyen la fuente de agua para los diferentes usos que destinen los sistemas administrativos correspondientes, facilitándoles la gestión de los recursos hídricos (Gochis *et al.*, 2006, Ray *et al.*, 2007).

Importancia de NAMS en la producción de agua de la cuenca del río Nazas

La cuenca del río Nazas enclavada en la parte alta de la SMO pero con drenaje hacia la altiplanicie del Desierto Chihuahuense es una de varias cuencas endorreicas del norte-centro de México, que forma parte de la Región Hidrológica 36, posee una superficie de 50,493 km², donde se encuentra una población cercana a 1.6 millones de habitantes, de los cuales el 72% habita la parte baja, donde se aprovecha la totalidad de escurrimientos, principalmente con fines agrícolas (Descroix *et al.*, 2004).

La precipitación en la cuenca del río Nazas muestra alta variabilidad en función a su elevación (Figura 5). La parte alta (2,800 a 3,000 msnm) posee una precipitación máxima de 800 mm anuales, con un gradiente decreciente hasta alcanzar 200 mm en su altitud más baja (1,000 msnm); esta información se soporta con el análisis de los registros de lluvia de una red de 60 estaciones climáticas, donde cerca del 80% de la precipitación se registra en los meses de junio a septiembre donde se ha observado una fuerte asociación al NAMS, mientras que el resto

ocurre en la estación invierno-primavera, cuya variación interanual se explica más por efecto del ENSO, donde los mayores volúmenes ocurren cuando dominan condiciones de la fase cálida de este fenómeno (Stahle *et al.*, 1998).

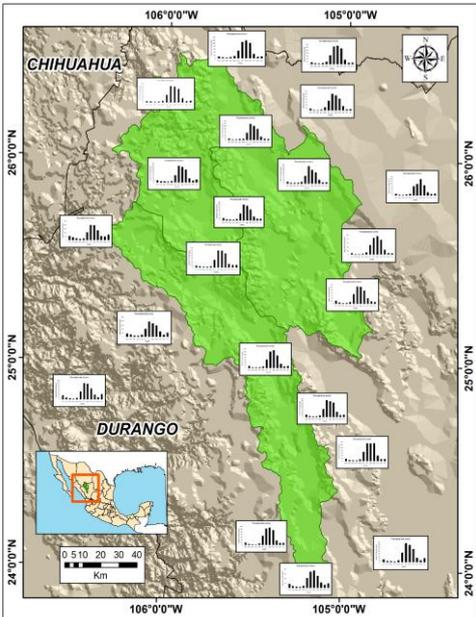


Figura 5. Distribución de la precipitación en algunas estaciones climáticas distribidas en la cuenca del río Nazas, donde se evidencia el período lluvioso Junio-Septiembre, lapso donde ocurre cerca del 80% de la precipitación anual. Esta cuenca se encuentra enclavada en la SMO con drenaje hacia la vertiente oriental.

Los recursos hídricos de la cuenca del río Nazas se producen en las subcuencas Sardinas o del Oro, río Ramos y Santiago Papasquiario y Tepehuanes (Figura 6).

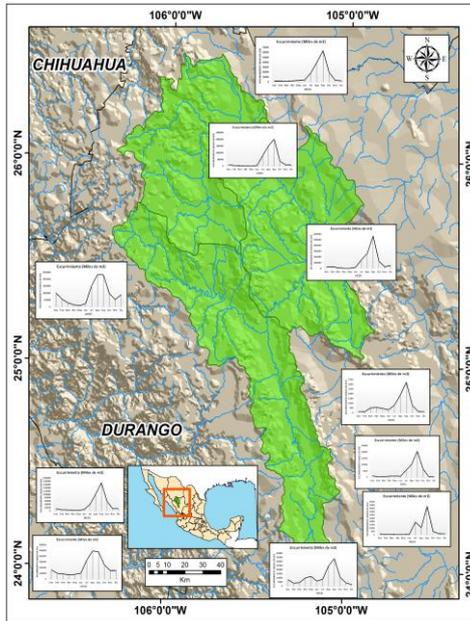


Figura 6. Distribución de estaciones hidrométricas dentro de la cuenca del río Nazas y en cuencas circunvecinas. Se observa que los mayores volúmenes de escurrimiento (aproximadamente 90%) ocurren en el período Junio-Octubre, los cuales derivan de las lluvias que se presentan durante el verano como consecuencia de la influencia de NAMS.

Estas subcuencas producen en su conjunto un promedio 800 Millones de metros cúbicos (Mm^3), que representan cerca del 90% de los escurrimientos que se almacenan en la presa “Lázaro Cárdenas”, la cual posee una capacidad de almacenamiento superior a $2,000 Mm^3$ y que posteriormente son transferidos a la presa de regulación “Francisco Zarco” para que durante la estación de crecimiento de los cultivos sean liberados a los módulos de riego del Distrito de Riego 017 en la Comarca Lagunera, área de asentamientos humanos ubicados en la parte baja de la cuenca (Descroix *et al.*, 2004; Estrada *et al.*, 2014)

Reconstrucción histórica de escurrimientos en la cuenca del río Nazas

La influencia de NAMS en la variabilidad histórica de los escurrimientos, se determinó mediante el desarrollo e integración de una red dendrocronológica de cronologías ubicadas en sitios elevados de la SMO, donde la cronología representativa de la cuenca alta del río Nazas, se relacionó con los registros hidrométricos de entradas acumuladas a la presa Lázaro Cárdenas, que consideran los volúmenes acumulados hasta antes del 01 de octubre de cada año, pero donde los escurrimientos producidos en el verano, particularmente con influencia de NAMS, constituyen cerca del 90% del escurrimiento anual (Villanueva *et al.*, 2005). De esta manera, en los últimos 260 años, la variabilidad de los escurrimientos en la cuenca alta del río Nazas ha mostrado períodos extremadamente secos y algunos de los más importantes se presentaron de 1760 a 1775 (16 años), 1818 a 1830 (13 años) y de 1949 a 1963 (15 años), con picos cada 133, 47, 34, 15, 11, y 8 años, respectivamente, lo que indica dominancia de períodos secos en frecuencias aproximadas de 50 años, como ha sido detectado en otros estudios de reconstrucción climática para el norte de México (Figura 7). Los períodos secos coinciden con valores bajos del Índice de Sequía de Severidad de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés), reconstruido con anillos de árboles para México (Stahle *et al.*, 2016). El PDSI aunque es un índice de sequía con valores en el rango de -4 (condiciones secas) a +4 (condiciones húmedas) y 0 (condiciones normales; constituye también un índice de balance hidrológico que toma en consideración para su cálculo, variables climáticas e hidrológicas y estima las condiciones de sequía para la estación cálida del año y por ende, los volúmenes de escurrimiento producidos en una cuenca; de esta manera, la integración de las condiciones de sequía de verano de uno de los períodos más secos ocurridos en el norte y en particular en la cuenca del Nazas fue el de 1949 a 1963 (Figura 8), el cual muestra la dominancia de condiciones secas en el norte de México y más o menos húmedas en el centro del país, situación que ha sido atribuida a la persistencia de anomalías de la temperatura superficial del mar en el Pacífico tropical, condición que se agrava cuando se producen condiciones

de temperaturas más frías en el Pacífico tropical y más cálidas en el Atlántico subtropical (Méndez y Magaña, 2010).

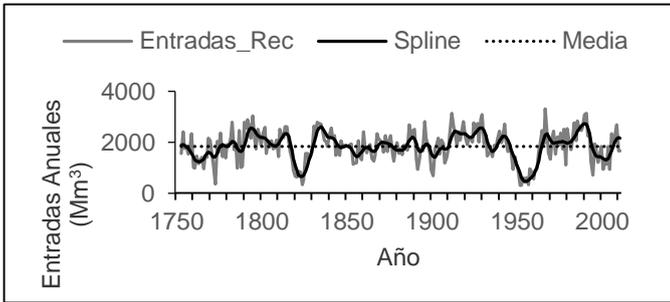


Figura 7. Reconstrucción de las entradas anuales con anillos de crecimiento de especies arbóreas a la presa de almacenamiento “Lázaro Cárdenas”, que capta todos los escurrimientos producidos en las partes al alta y media de la cuenca del río Nazas. La línea horizontal punteada corresponde al escurrimiento medio reconstruido; la línea en gris corresponde a los valores de entradas anuales y la línea flexible obscura es una curva suavizada decenal para resaltar períodos secos y húmedos. Los períodos con menor escurrimiento se presentaron de 1760 a 1775 (16 años), 1818 a 1830 (13 años) y de 1949 a 1963 (15 años).

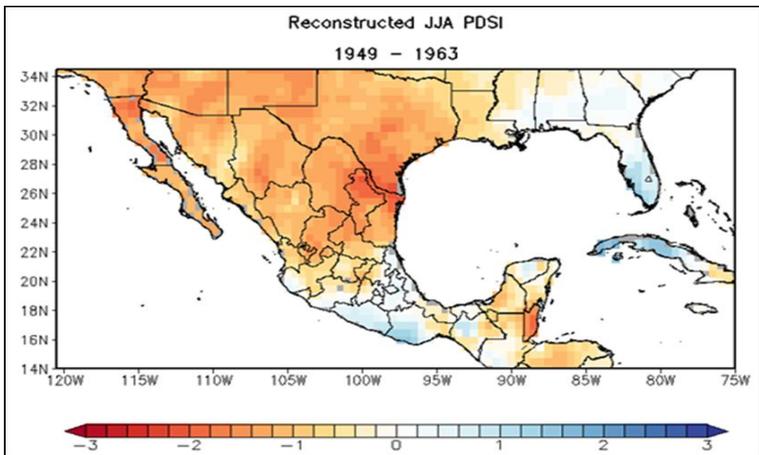


Figura 8. Condiciones hidroclimáticas dominantes en México en el período 1949-1963. Se observa la dominancia de condiciones muy secas en el norte-centro de México (valores negativos en color rojo y amarillo) y húmedas en el sur (azul cielo). En este período, se tuvo un debilitamiento de NAMS. La sequía de la década de 1950-1960, favoreció el fenómeno social conocido como “*bracerismo*” hacia los EUA (Florescano, 1980).

La captación de agua en la presa Lázaro Cárdenas determinada con registros hidrométricos y con base a la legislación de agua en el Distrito de Riego 017, ha permitido la liberación de volúmenes de agua superiores a 1,000 Mm³ anuales; no obstante, es importante considerar la presencia en la reconstrucción de períodos prolongados de sequía con más de 15 años consecutivos y que no están presentes en los registros instrumentales, que de presentarse en un futuro pudieran tener un profundo impacto en la estabilidad social y económica de la región; situación que pudiera ser agravada con la influencia del calentamiento global, cuyos modelos de predicción sugieren condiciones de mayor aridez para el norte de México (Seager *et al.*, 2009).

Conclusiones

La disminución en la disponibilidad de agua a consecuencia de un aumento en la demanda del recurso y de un incremento en la variabilidad interanual en el ciclo de lluvia, influenciada por el calentamiento global, requiere de un entendimiento de los fenómenos circulatorios que, de manera natural, determinan la mayor o menor disponibilidad hídrica en el tiempo. Las cuencas hidrológicas ubicadas en las partes elevadas de la SMO proveen de agua a los asentamientos humanos establecidos en las partes bajas de las cuencas, pero esta provisión depende de la influencia de fenómenos circulatorios como es NAMS, cuyo comportamiento hidrológico tiene alta influencia de las actividades humanas a través de cambios en la cubierta vegetal y acciones colaterales, que maximizan procesos erosivos y acarrearán pérdida de la biodiversidad y de la capacidad productiva de los ecosistemas.

El entendimiento de los procesos físicos e impacto en la producción de agua en cuencas hidrológicas como es la del río Nazas, contribuye a mejorar nuestro entendimiento de los fenómenos que determinan la variabilidad en su disponibilidad y a proveer de información técnica a los tomadores de decisiones para su manejo sustentable. En este documento, se aborda el entendimiento del comportamiento físico del fenómeno NAMS y se realiza una reconstrucción histórica de la influencia de este fenómeno en la producción de escurrimientos en la cuenca alta del río Nazas; volúmenes que explican el desarrollo social y económico de la región Lagunera, pero donde eventos de sequía prolongados y de gran intensidad ocurridos en los sitios de producción de agua, y que no están registrados en los datos instrumentales, pudieran presentarse en un futuro cercano y exacerbar el problema de disponibilidad hídrica en la zona; por lo que esta información cobra relevancia especial, para diseñar estrategias de manejo que contribuyan a mitigar el impacto de estos eventos potenciales.

Literatura citada

- Adams, D., A.C. Comrie. 1997. The North American Monsoon. *Bulletin of the American Meteorology Society* 78(10): 2197-2200.
- Comrie, A.C., E.C. Glenn. 1998. Principal components-based regionalization of precipitation regimes across the southwestern United States and northern Mexico, with an application to monsoon precipitation variability. *Climate Research* 10: 201-215.
- Cook, I., R. Seager. 2013. The response of the North American monsoon to increased greenhouse gas forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(4): 1690-1962.
- Descroix, J., J.F. Nouevelot, M. Vauclin. 2002. Evaluation of antecedent precipitation index to model runoff yield in the western Sierra Madre (North-west Mexico). *Journal of Hydrology* 263: 114-130.
- Descroix, J., D. Viramontes, E. Anaya, H. Barral, A. Plenecassagne, J.L. González, J. Bacan, L. Macías. 2004. Agua amenazada por la degradación de los recursos vegetales. In Descroix, L., J.L. González, J. Estrada (Eds.). *la Sierra Madre Occidental una fuente de agua amenazada*. INIFAP-IRD. Gómez Palacio, Durango, México. P. 195-210.
- Douglas, M.W., R.A. Maddox, K. Howard, S. Reyes. 1993. The Mexican Monsoon. *American meteorological Society* 6: 1665-1677.
- Englehart, P., A. Douglas. 2005. Changing behavior in the diurnal range of surface air temperatures over Mexico. *Geophysical Research Letters* 32(1): 1-4.
- Estrada Avalos, J., G. Delgado R., M. Palomo R., M. Rivera G., Ma. R. Jacobo S., J. Villanueva D. 2014. La cuenca del río Nazas en el norte de México: condición e iniciativas en la

conservación de sus recursos naturales. *Agrofaz* 14(2): 123-135.

Florescano, E. 1980. Una historia olvidada: la sequía en México. *Nexos* 32: 9-13.

Gochis, D., L. Brito, J. Shuttleworth. 2006. Hydroclimatology of the North American Monsoon region in northwest Mexico. *Journal of Hydrology* 316 (1-4): 54-58.

Griffin, D., D.M. Meko, R. Touchan, S.W. Leavitt, C. Woodhouse. 2011. Latewood chronology development for summer moisture reconstruction in the US Southwest. *Tree-Ring Research* 67(2): 87-101.

Griffin, D., C. Woodhouse, C., D. Meko, D.W. Stahle, H. Falstich, C. Carrillo, S. Leavitt. 2013. North American monsoon precipitation reconstructed from tree-ring latewood. *Geophysical Research Letters* 40: 954-958.

Higgins, R.W., Y. Yao, X. Wang. 1997. Influence of the North American monsoon system on the U.S. summer precipitation regime. *Journal of Climate* 10: 2600-2632.

Higgins, R.W., Y. Chen, A.V. Douglas. 1999. Interannual variability of the North American warm season precipitation regime. *Journal of Climate* 12: 653-680.

Hyung Jin, K., B. Wang, Q. Ding. 2008. The global monsoon variability simulated by CMIP3 coupled climate models. *Journal of Climate* 21: 5272-5273.

IPCC. 2014. Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad.

Lachniet, M.S., Y. Asmeron, V. Polyak, J.P. Bernal. 2017. Two millennia of Mesoamerican monsoon variability driven by Pacific and Atlantic synergistic forcing. *Quaternary Science Reviews* 155: 100-113.

- Meko, D.M., C.H. Baisan. 2001. Pilot study of latewood-width of conifers as an indicator of variability of summer rainfall in the North American monsoon region. *International Journal of Climatology* 21: 697-708.
- Méndez, M., & Magaña, V. 2010. Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate* 23: 1176-1178.
- Metcalfe, S.E., J.A. Barron, S.J. Davis. 2015. The Holocene history of the North American Monsoon: “known knows” and “Known unknowns” in understanding its spatial and temporal complexity. *Quaternary Science Reviews* 120: 1-27.
- Moss, R.H., J.A. Edmonds, K.A. Hibbard, M.R. manning, S.K. Rose, D.P. Van Vauren, T.R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G.A. Meehl, J.F. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S.J. Smith, R.J. Stouffer, A.M. Thompson, J.P. Weyant, T.J. Wilbanks. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463: 747-756.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*. 19 de Julio de 2006 The North American Monsoon. Obtenido de National Weather Service Climate Prediction Center: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/outreach/Report-to-the-Nation-Monsoon_aug04.pdf
- Ray, A.J., G.M. Garfin, M.W. Wilder, M. Vázquez-León, M. Lenart, A.C. Comrie. 2007. Applications of monsoon research: opportunities to inform decision making and reduce regional vulnerability. *Journal of Climate* 20: 1608-1627.
- Reyes, S., M. Douglas, R. Maddox. 1994. El monzón del suroeste de Norteamérica. *Atmósfera* 7: 117-123.
- Ropelewski, C.F., D.S. Gutzler, R.W. Higgins, G.R. Mechoso. 2005. The North American Monsoon SWystem. In: C.P. Change, B. Wang, N.C.G. Lau (Eds.). *The Global*

- Monsoon System: Research and Forecast, pp. 207-218. WMO. Technical document 1266. Geneva.
- Seager, R., Tzanova, A., & Nakamura, J. 2009. Drought in the Southeastern United States: Causes, variability over the Last Millennium, and the potential for future hydroclimatic change. *Journal of Climate* 22: 502-5024.
- Stahle, D.W., R.D. Dárrigo, P.J. Krusic, M.K. Cleaveland, E.R. Cook, R.J. Allan, J.E. Cole, R.B. Dunbar, M.D. Therrell, D.A. Guy, M.D. Moore, M.A. Stokes, B.T. Burns, J. Villanueva-Diaz, and L.G. Thompson. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 70(10): 2137-2152.
- Stahle, D.W., M.K. Cleaveland, H.D. Grissino-Mayer, R.D. Griffin, F.K. Fye, M.D. Therrell, D.J. Burnett, D.M. Meko, J. Villanueva-Diaz. 2009. Cool- and warm-season precipitation reconstruction over western New Mexico. *Journal of Climate* 22: 3729-3750.
- Stahle, D.W., E.R. Cook, D.J. Burnette, J. Villanueva, J. Cerano, J.N. Burns, D. Griffin, B.J. Cook, R. Acuña, Max C.A. Torbenson, P. Sjezner, and J.M. Howard. 2016. The Mexican drought atlas: tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Review* 149:34-60.
- Turrent, C., T. Cavazos. 2009. Role of land-sea thermal contrast in the interannual modulation of the North American Monsoon. *Geophysical Research Letters* 36, L02808: 1-5.
- Villanueva, D.J., B.H. Luckman, D.W. Stahle, M.D. Therrell, M.K. Cleaveland, J. Cerano-Paredes, G. Gutierrez-Garcia, J. Estrada-Avalos, R. Jasso-Ibarra. 2005. Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera. *Dendrocronologia* 22(3): 215 – 223.

- Vivoni, E., H. Moreno, G. Mascaro, J. Rodríguez, C. Watts, J. Garatuza, R. Scott. 2008. Observed relation between evapotranspiration and soil moisture in the north American monsoon region. *Geophysical Research Letters*, 2-6.
- Watt, C., R. Scott, J. Garatuza, J., Rodríguez, J. Prueger, W. Kustas, M. Douglas. 2007. Changes in vegetation condition and surface fluxes during NAME 2004. *Journal of Climate* 10: 1810-1820.
- Young, Y., B. Wang, L. Jian, W. Zhiwei. 2014. A comparison of regional monsoon variability using monsoon indices. *Climate Dynamics* 43: 1423-1424.

Agradecimientos

Para la generación de la información contenida en este documento, se agradece el apoyo otorgado a través de los proyectos fiscales INIFAP “*Reconstrucción de caudales e influencia de fenómenos de circulación general en cuencas del Pacífico Mexicano*” y “*Reconstrucción de caudales e influencia de fenómenos de circulación general en cuencas de la Sierra Madre Occidental*”.



Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Centros Nacionales de Investigación Disciplinaria, Centros de Investigación Regional y Campos Experimentales



- ◆ Sede de Centro de Investigación Regional
- Centro Nacional de Investigación Disciplinaria
- ◆ Campo Experimental

COMITÉ EDITORIAL DEL CENID-RASPA

Presidente: Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Secretario: Dr. Juan Estrada Ávalos

Vocales: M.C. Miguel Rivera González

M.C. Gerardo Esquivel Arriaga

Revisores técnicos

Dr. Víctor Manuel Rodríguez Moreno

Edición y Diseño

M.C. Aldo Rafael Martínez Sifuentes

La presente publicación se terminó de imprimir el mes de diciembre del año 2017 en los talleres de Carmona Impresores S.A. de C.V., Calzada Lázaro Cárdenas No. 850. Colonia Eduardo Guerra. C.P. 27280 Torreón Coahuila, México. Su tiraje consta de 600 ejemplares.

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA EN LA RELACIÓN AGUA SUELO PLANTA ATMÓSFERA

Dr. Juan Estrada Ávalos
Director
Ing. Armando Estrada González
Jefe de Operaciones
Lic. Flor Carina Espinoza Delgadillo
Jefe Administrativo

Personal Investigador

M.C. Palmira Bueno Hurtado
Dr. Ernesto Alonso Catalán Valencia
Dr. Julián Cerano Paredes
M.C. Vicenta Constante García
M.C. Gerardo Delgado Ramírez
M.C. Gerardo Esquivel Arriaga
Dr. Juan Estrada Ávalos
Dr. José Luis González Barrios
Dr. Guillermo González Cervantes
Dr. Marco Antonio Inzunza Ibarra
M.C. Rosario Jacobo Salcedo
M.C. Hilario Macías Rodríguez
Dr. Jesús Arcadio Muñoz Villalobos
Dra. Erika Nava Reyna
M.C. Miguel Rivera González
Dr. Ignacio Sánchez Cohen
M.C. Ramón Trucios Caciano
Dra. Ma. Magdalena Villa Castorena
Dr. José Villanueva Díaz

WWW.INIFAP.GOB.MX

La precipitación y los escurrimientos que se generan en cuencas hidrológicas que tienen su origen en las vertientes occidental y oriental de la Sierra Madre Occidental, constituyen la base fundamental para el desarrollo social y económico de asentamientos humanos ubicados en las partes bajas de estas cuencas. La precipitación que ocurre en el verano, que constituye hasta el 80% del total anual es la que determina la mayor o menor disponibilidad de agua con fines agrícolas, industriales y consumo humano. El conocer los fenómenos climáticos que explican la variabilidad de la precipitación en el verano resulta de gran importancia con fines de modelar su comportamiento y tener cierta capacidad predictiva. En este documento se describe de manera simple el proceso físico que da origen al Monzón de Norteamérica y se analiza su variabilidad interanual con anillos de árboles en los últimos 250 años para la cuenca alta del río Nazas.