

ANÁLISIS DE MODIFICACIONES DEL CAUDAL EN EL RÍO COLORADO DEBIDO AL CAMBIO CLIMÁTICO, Y REPERCUSIONES EN EL VALLE DE MEXICALI

Norman Edilberto Rivera Pazos ^P

Enriqueta Salazar Ruiz

Instituto Tecnológico de Mexicali

Abstract

The Colorado River rises in the Rocky Mountains in Colorado, USA and passes through Utah, Arizona, Nevada, California, and two Mexican states: Baja California and Sonora. His flow is crucial to irrigate the desert plains of these regions.

Motivated by the increasingly frequent disasters caused by natural phenomena that are evident changes in global weather patterns, this paper analyzes the consequences that may result from an unusual increase in water level of the Hoover Dam, located in Nevada, U.S. and Morelos Dam, located on the Mexican side, in Baja California, which control the flow of Colorado River water.

We study the different climatic phenomena that occur upstream of dams, such as melting in the Rocky Mountains and the North American monsoon, its variability due to climate change and the increase in river flow as a direct result of abnormal these phenomena. In addition, we estimate the real implications of flooding in the region near the Colorado River Delta because of its mountainous terrain, and consider possible alternatives for prevention.

Keywords: *climate change; north american monsoon; colorado river.*

Resumen

El río Colorado, nace en las Montañas Rocosas, en el estado de Colorado, E.U. y pasa por Utah, Arizona, Nevada, California, y dos estados mexicanos: Baja California y Sonora. Su flujo es fundamental para irrigar a las llanuras desérticas de esas regiones.

Motivados por las cada vez más frecuentes catástrofes originadas por fenómenos naturales que hacen evidentes las modificaciones de patrones climáticos globales, este trabajo analiza las consecuencias que se pueden derivar de un incremento inusual en el nivel de agua de las presas Hoover, ubicada en Nevada, U.S. y Morelos, ubicada en el lado mexicano, en Baja California, las cuales controlan los flujos de agua del Río Colorado.

Se estudian los diferentes fenómenos climatológicos que ocurren aguas arriba de las presas, tales como el deshielo en las montañas Rocosas y el monzón de Norteamérica, su variabilidad debido al cambio climático y el incremento en el caudal del río como una consecuencia directa de las anomalías de estos fenómenos. Además, se estiman las implicaciones reales de inundación en la región cercana al delta del río Colorado debido a sus condiciones orográficas, y se plantean posibles alternativas de prevención.

Palabras clave: cambio climático; monzón de Norteamérica; río colorado.

1. Introducción

El presente trabajo gira en torno al caudaloso río Colorado y fenómenos climáticos que afectan su caudal. Este río nace al pie de las Montañas Rocosas, en el Lago La Poudre Pass, en Colorado, Estados Unidos. A su paso se cuentan siete refugios de vida silvestre, cuatro áreas de recreación, cinco parques nacionales, incluyendo al Gran Cañón del Colorado, en Estados Unidos y una reserva de la biosfera en México donde persisten 150 especies endémicas que dependen de sus aguas y hacen que para los que vivimos de él y en su zona de influencia, nos resulte apasionante conocerlo y reconocerlo en toda su magnitud.

Es también el río más regulado Estados Unidos por su importancia en el abastecimiento de agua en siete estados de la unión americana (Wyoming, Utah, Colorado, Nevada, California, Arizona y Nuevo México) y dos en la república mexicana (Baja California y Sonora) donde nos favorecemos más de 30 millones de personas (Pitt, 2001).

La sección geográfica del río de mayor interés en este estudio es la parte baja de la cuenca, y en su historia, en la primera década del siglo XX se registró una inundación en el valle Imperial, en Estados Unidos y donde actualmente se asienta la ciudad de Mexicali incluido su valle (Samaniego, 2008). A partir de este acontecimiento se planeó la construcción presas, diques o bordos que guiaran el cauce del río hasta el Golfo de California, sin riesgo de que las aguas invadieran nuevamente las zonas de cultivo y los asentamientos humanos.

Contrariamente a lo sucedido en esa época, en las últimas décadas se ha visto un descenso paulatino en los niveles de sus cuencas y presas construidas, de manera que actualmente se manejan acciones para las condiciones de sequía, proponiéndose nuevos programas de cooperación, regulaciones, proyectos que buscan mantener los compromisos de entrega de agua y optimización de su uso, y un sin número de previsiones ante la inminente escasez.

Esto deja un tanto de lado los estudios de los fenómenos naturales o acciones que afectan los cambios de flujos río abajo, que generalmente incrementan el caudal de manera intempestiva y pudieran tener impactos negativos de corto y largo plazo. No obstante, Mexicali, ciudad capital del estado de Baja California, está en el antiguo delta del río y eso nos lo recordó lo sucedido en la década de los 80's cuando se presentó una descarga superior a la normal en las presas, lo que originó que los excedentes de agua en el delta del río inundaran zonas que se consideraban secas, tales como la Laguna Salada, ubicada al oeste de la ciudad de Mexicali, y que permanecieran así por cerca de diez años.

Estos excedentes de agua se debieron a un deshielo inusitado en las montañas Rocosas, lo mismo que a eventos intensos del monzón de Norteamérica, el cual se registra cada año en los estados del norte de México y en Arizona y Nuevo México, principalmente. Así mismo, estos eventos parecen tener conexión con un evento intenso de *El Niño* ocurrido en 1982-1983 (USGS, 2004). De aquí la importancia de profundizar en el tema, buscando una mayor certeza, por ejemplo, en cuanto a qué tan intenso tendría que ser un evento de *El Niño* para generar un caudal en el río que no fuera posible controlar con los diques que se encuentran actualmente delimitando el cauce.

Existen otros factores de riesgo que valdría la pena considerar como las fallas tectónicas presentes en la región, las cuales son fuentes de terremotos como el sucedido el 04 de abril del 2010 de 7.2° Richter que pudieran fracturar presas y diques. También el deshielo de los casquetes polares, pudiera analizarse como factor de riesgo de inundación, entre otros, que seguramente será interesante considerar en futuros trabajos.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general.

En este trabajo se establecen conclusiones respecto a posibilidades de riesgos especialmente en el delta del río Colorado, en la parte mexicana, relacionados a fenómenos naturales y otros eventos cuyo comportamiento pudieran incrementar intempestivamente el caudal del río.

3. Metodología

3.1. Caracterización de la zona de estudio. Cuenca del Río Colorado.

Se origina en La Poudre Pass, en la parte norte de las montañas Rocosas de Colorado en Estados Unidos, a 3,104 metros de elevación, ubicándose su nacimiento en las coordenadas 40° 28' 20" N, 105° 49' 34" O. Como se aprecia en la **Figura 1**, cruza parte de los estados de Colorado, Utah, Arizona y California en Estados Unidos y finaliza su recorrido natural en territorio mexicano pasando por los estados de Baja California y Sonora, donde se encuentra el delta del río, desembocando en el Alto Golfo de California, también conocido como *Mar de Cortés* con elevación de 0m y coordenadas 31° 39' 0" N, 114° 38' 0" W. Recorre 2333.54km y en toda su cuenca transfronteriza cubre un área de 637137km² (Kammerer, rev.1990) en siete estados estadounidenses (Wyoming, Utah, Colorado, Nevada, California, Arizona y Nuevo México) y dos en la república mexicana (Baja California y Sonora) que incluye además 27 tribus que tienen derecho a usar sus aguas. (Pontius, 1997), por lo que puede afirmarse que la cuenca del río Colorado conforma un sistema hídrico binacional México-Estados Unidos fundamental para ambos países.



Figura1. Esta imagen muestra la cuenca del río Colorado en líneas punteadas rojas. La línea central punteada es conocida como "Lee's Ferry" y separa la cuenca en **parte alta** y **parte baja** del río. Las presas más importantes de la parte baja están indicadas en verde. Fuente: Imagen modificada de <http://img268.imageshack.us/i/ríocolorado1.png>

La cuenca del río Colorado se divide en la **parte alta** y la **parte baja** (también conocida en la literatura como **cuenca superior** y **cuenca inferior**. Se maneja de manera indistinta estos nombres en este documento), cuyo punto de división es conocido como Lee's Ferry, (**Figura 1**) ubicada al norte de Arizona, en la frontera con Utah y al oeste de Las Vegas, Nevada. En ambas partes del río se han construido un costoso sistema de represas y un gran número de desviaciones para el riego de parcelas de cultivo como uso primordial en Estados Unidos y México, la evaporación en las represas constituye el segundo uso en niveles de litros de agua que proporciona el río. En tercer lugar están las desviaciones fuera de la cuenca del Colorado, hacia a Los Ángeles, y como cuarto en importancia por los niveles de agua usados, está el uso en las ciudades para consumo humano e industrial.

Las variaciones del caudal en el río Colorado se registran a partir de las mediciones realizadas en Lee's Ferry, la estación que se toma como referencia para dividir la cuenca superior de la inferior. Esta variabilidad se debe tanto a las fluctuaciones climáticas como a los cambios en el uso de la recurso, aguas arriba de la estación. El análisis de los datos registrados en esta estación muestran que en promedio el volumen anual de agua en el río es de 12.4 millones acre-pie (MAF) = 15,295 millones de m³ (1 acre-pie=1233.5 m³). El volumen de agua en el río decrece en 0.5 MAF (617 millones de m³) cada año desde 1895, en buena parte debido al uso del agua corriente arriba. El volumen tri-anual promedio más alto fue de 20.3 MAF para el periodo 1983-1985. El flujo anual más bajo se registró en 2002, con 3.8 MAF. En el inicio del siglo XXI, se ha obtenido en Lee's Ferry el promedio tri-anual más bajo obtenido en los últimos 100 años, con sólo 5.4 MAF en el periodo 2001-2003.(USGS, 2009)

Al llegar el río Colorado a la frontera con México, la presa *Morelos* constituye la última gran construcción en la corriente del río. A lo largo de 12 km, la frontera sigue al río, después de lo cual sus aguas se internan completamente en México, delimitándose el delta por las montañas Cucapá al oeste, y la Mesa de Sonora al este. Dos islas, Montague y Pelicano, marcan el lugar donde el delta llega al Golfo de California al sur. Otro elemento importante de mencionar es la Laguna Salada, una depresión seca al oeste del delta a la cual llega el agua del Río Colorado cuando la corriente es alta.

Durante el siglo XX, los flujos del río hacia el delta se han reducido en un 75%, pasando de un promedio anual de $20.7 \times 10^9 \text{ m}^3$ entre los años 1896 y 1921 (Fradkin, 1981), a un promedio anual entre 1984 y 1999 de $5.2 \times 10^9 \text{ m}^3$.

Actualmente gran parte del alto delta ha sido convertido en tierras de riego, y los diques y canales han cambiado significativamente al delta. En el bajo delta, donde la salinidad imposibilita la agricultura, los efectos de la desviación del agua y el desarrollo son claramente visibles.

3.2. Delta del río Colorado y diques en el valle de Mexicali.

Una de las características del río Colorado, antes de la construcción de las presas, era la gran irregularidad de sus gastos. Así, se tuvieron mínimos en septiembre de 1934 hasta de 11m³/s, y máximos de 7000 a 8400 m³/s en 1884, en los meses de junio y julio, épocas correspondientes a los deshielos de las montañas en la parte alta de la cuenca, que era la fuente principal de provisión de aguas. La precipitación es baja generalmente: en 40% de la superficie llueve menos de 20 cm; en 50% llueve entre 20 y 40 cm y en el 10% restante, entre 40 y 60 cm anuales.

La desembocadura del río Colorado difiere de otras zonas deltaicas. Esta gran corriente, al desviarse lateralmente, formó una barrera de azolve que interceptó las aguas del golfo de

California y dejó aislada la porción superior, que con el tiempo llegó a desecarse por completo. Su parte más profunda, convertida en un lago interior, se conoce actualmente con el nombre de mar de Salton.

Otra peculiaridad de la morfología deltaica, consecuencia evidente abanico aluvial mencionado, es la elevada y ancha cresta en el valle de Mexicali, la cual divide dos vertientes con declives desiguales (**Figura 2**): hacia el golfo de California una de ellas, y a la depresión antes mencionada, la de mayor desnivel. Así quedó bifurcado el bajo delta propiamente dicho, por lo que desembocaba indistintamente hacia el golfo o, en ocasiones, cuando resultaba insuficiente este cauce, hacia la depresión de Salton (Meade, 1996).

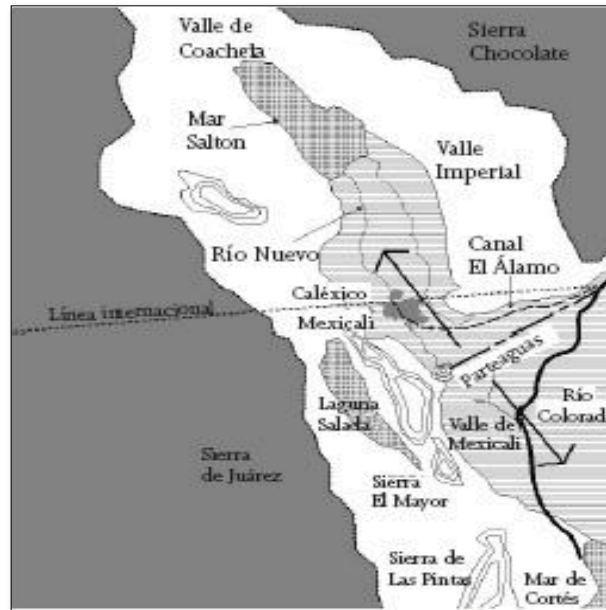


Figura 2. Región del Delta del río Colorado donde se ven las dos vertientes. Hacia el noroeste, la del mar de Salton, y hacia el sureste, la del golfo de California (**García y Aragón, 2008**).

En 1905 se registró una creciente inesperada en el río, provocando que se saliera de control la corriente de agua en el canal Álamo y en consecuencia, la inundación de los valles de Mexicali e Imperial.

Esta experiencia motivó la construcción de diques en estos valles (**Figura 3**), para proteger las zonas de cultivo y los asentamientos humanos. La California Development Company era la compañía encargada de la administración de las aguas en la región y fue quien inició la construcción de esos diques. Así, dos años después de la inundación se construyó el dique o bordo Volcano o también llamado Los Volcanes (1907), el bordo Ockerson en 1909, el Saíz en 1918, el de las Abejas y Pescaderos en 1922, el Rodríguez en 1927 y el San Luis y Bacanora en 1929, entre otros.

Así mismo, en 1922 se propuso la construcción de un sistema de presas que regularan el flujo del río, fue el llamado Colorado River Compact. De las presas construidas en el río Colorado, la presa Hoover y la presa Glenn Canyon son las más importantes. La primera se empezó a construir en 1931 y la segunda en 1956.

Se tiene registro de que en 1983 hubo una importante crecida del río debido a la fusión rápida de la nieve y a lluvias muy intensas. Ello obligó a poner en servicio los aliviaderos que estuvieron desaguando desde el 2 de junio hasta el 23 de julio (Casafont, 1990).

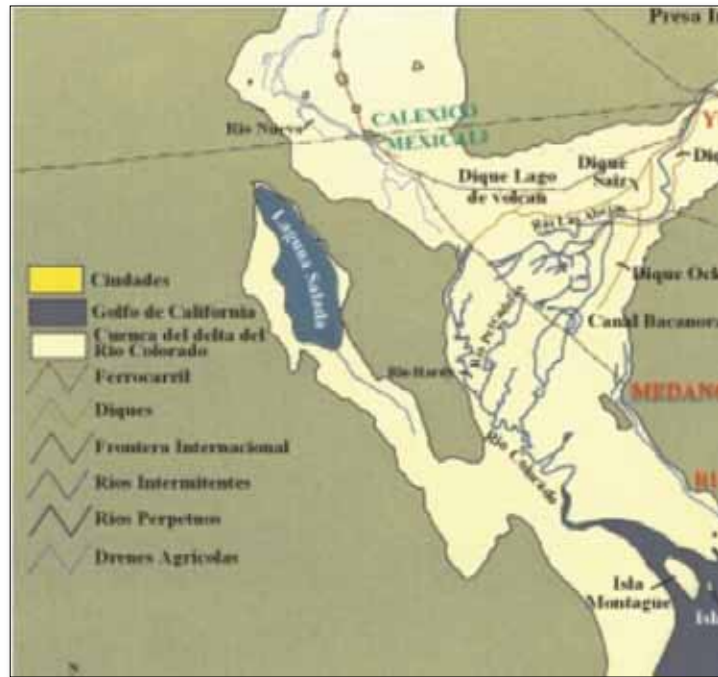


Figura 3.Región del Delta del río Colorado en 1933. Se observa la ubicación de la ciudad de Mexicali, dentro de la cuenca, y algunos de los diques que se construyeron en el siglo XX (Luecke et al, 1999).

3.3 El clima en la región.

Arizona recibe la mayoría de su precipitación anual en dos distintas estaciones, invierno y verano. La precipitación de invierno es producida por un sistema de baja presión de gran escala en superficie que atraviesa el sureste, arrastrando humedad del océano pacífico y produciendo lluvia generalizada y nieve. La energía de este sistema de baja presión se alimenta por las corrientes de chorro en niveles altos (20,000 pies aproximadamente) de latitudes medias y subtropical, activas en el suroeste de los Estados Unidos durante el invierno. Por otro lado, la precipitación de verano es el resultado de características atmosféricas diversas. La corriente de chorro de latitudes medias se retira al norte durante el verano y la corriente de chorro subtropical es reemplazada por un sistema de alta presión anclado sobre el océano pacífico del este. El mecanismo que produce la precipitación de verano no está asociado con las corrientes de chorro de gran escala o con los fuertes sistemas de baja presión, sino con las tormentas convectivas que surgen por la combinación de calentamiento solar y humedad. La luz y el calor del sol están siempre disponibles en toda la región, pero no siempre ocurre así con la humedad. Pero ocurre un cambio sutil en el patrón de circulación del verano que favorece el flujo de humedad desde el sur, el cual incrementa dramáticamente las tormentas convectivas en todo el estado. A este cambio sutil en el patrón de circulación se le llama monzón de Norte América (The University of Arizona Cooperative Extension, 2006).

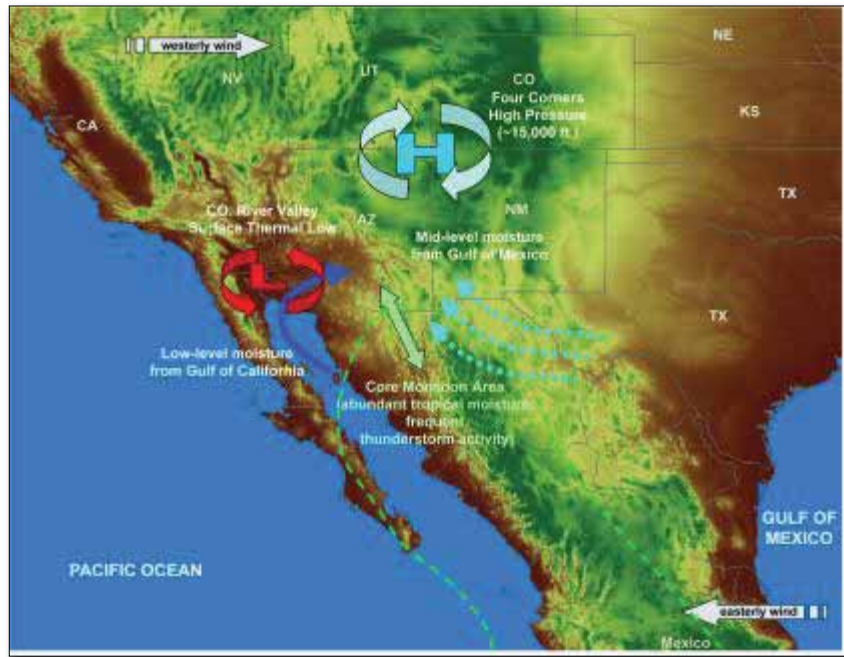


Figura 4. Principales rasgos del monzón de Norteamérica. Los sistemas de alta presión (H) y de baja presión (L), los flujos de humedad, de niveles bajos desde el golfo de California y de niveles medios y altos desde el golfo de México, así como la corriente de chorro del oeste en latitudes medias y la corriente de chorro tropical del este en cuyo flujo se presentan las ondas del este (Truebe, 2010).

Al monzón de Norteamérica también se le conoce como el *monzón del suroeste de los Estados Unidos*, el *monzón mexicano* o el *monzón de Arizona* y se caracteriza por un incremento pronunciado de la lluvia, de un increíblemente seco mes de junio a un lluvioso julio sobre grandes áreas del suroeste de Estados Unidos y noroeste de México. Esta lluvia ocurre al menos hasta la mitad de septiembre cuando se reestablece nuevamente el régimen seco sobre la región. Varios investigadores coinciden en que la mayor fuente de humedad que alimenta al monzón proviene del océano pacífico tropical del este-Golfo de California, sin embargo, el Golfo de México es visto como una importante fuente de humedad también. De hecho, sugieren que en bajos niveles la humedad viene del Golfo de California, mientras que en niveles altos la humedad proviene del Golfo de México (Figura 4).

En cuanto a la zona donde se desarrolla el monzón, en el suroeste de los Estados Unidos, los estados más influenciados son Arizona y Nuevo México, sin embargo, la humedad y las tormentas se extienden aún al Valle del “bajo” río Colorado y el desierto de Mojave, y más al oeste, hasta el sur de California, con cierta regularidad. Se sabe que el sur y el este de Arizona, la mayor parte de Nuevo México y el centro sur de Colorado reciben precipitación asociada al monzón (Adams y Comrie, 1997).

La región noroeste de México es generalmente semi-árida con un régimen de precipitación anual dominado por la convección del verano que interactúa con la topografía regional y los cuerpos de agua de los alrededores. La circulación monzonal de verano, la precipitación y la respuesta hidrológica a la misma, exhiben una considerable variabilidad espacial y temporal. Esta variabilidad complica los esfuerzos de diagnóstico y predicción y limita el manejo adaptativo de los recursos de agua regionales (Gochis et al, 2006).

4. Planteamiento

4.1 Influencia del clima en la cuenca del río Colorado.

Los sistemas de núcleo caliente (depresiones tropicales, tormentas tropicales y huracanes) se forman en el este del Océano Pacífico Norte, en la costa oeste de México. Estas tormentas rara vez tocan tierra en la costa de los Estados Unidos, puesto que se disipan en el océano, sin embargo la humedad residual de tales tormentas, que puede ser considerable, es ocasionalmente transportada tierra adentro al suroeste de los Estados Unidos y da lugar a precipitación que puede generar inundaciones en la parte sur de la cuenca del río Colorado.

El fenómeno conocido como El Niño-Oscilación sur ha sido ligado a la ocurrencia de inundaciones en la parte baja del y río Colorado, y a inundaciones y sequías en el oeste de los Estados Unidos. Tormentas en inviernos cálidos se han incrementado durante El Niño causando escurrentías en el río arriba del promedio e inundaciones en el suroeste, como ocurrió en 1982-1983. Aunque no todos los eventos de El Niño producen un incremento en la escurrentía., ya que en 2002-2003 hubo un episodio cálido y la escurrentía fue abajo del promedio. Y lo mismo ocurre cuando se presenta La Niña, no siempre ocurre una baja escurrentía. Esto significa que debe haber alguna otra condición, además de El Niño, que influye en los patrones del tiempo y el clima que se refleja en el río Colorado.

En los años 90 algunos científicos identificaron otro patrón de temperatura del océano arriba de los 20° de latitud en el Océano Pacífico, el cual fue llamado Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés). Esta oscilación varía en una escala decadal de 30-50 años para el ciclo total, esto es, que gran parte del Océano Pacífico del Norte será predominantemente aunque no uniformemente caliente (o frío) para periodos de alrededor de 15 a 25 años. Recientes estudios indican que las fases de esta oscilación pueden estar asociadas con periodos de longitud decadal de la precipitación por arriba o por abajo del promedio y el flujo en la cuenca del río Colorado, pero, al igual que en el caso de El Niño, las asociaciones no son siempre consistentes.

Más recientemente, los investigadores descubrieron que las temperaturas de superficie del mar en el Océano Atlántico Norte muestran un patrón de largo plazo persistente similar al del Océano Pacífico. El patrón, identificado como la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés), refiere periodos multidecadales fríos o calientes en la temperatura del océano cada 20 o 35 años. Estos periodos indican que la AMO es más persistente que la PDO. Resultados preliminares indican que estos periodos largos de persistencia en las temperaturas del Atlántico pueden estar asociados con el envío de humedad a los Estados Unidos.

En los estudios de sequía, usando reconstrucciones de patrones de precipitación en el norte de Utah, se observó que desde el siglo XII han ocurrido 9 sequías con una duración de 15 a 20 años y cuatro con una duración mayor a 20 años. Por otro lado, las tres sequías ocurridas en el siglo XX, con un periodo aproximado de 4 a 11 años indican que las condiciones actuales de sequía podrían revertirse en condiciones húmedas en cualquier momento (USGS, 2004).

4.2 Variabilidad del monzón de Norteamérica.

No hay un veredicto claro acerca de cómo el monzón de Norteamérica podría ser afectado por el calentamiento global. Sin embargo, evidencia circunstancial sugiere que los monzones se intensificarán a medida que el calentamiento del océano y la superficie de la

tierra incrementen y en consecuencia, aumente la humedad del aire. Una de estas evidencias es que el ascenso en la temperatura de superficie del océano está ligado a la precipitación, sin embargo la forma en que se da esta conexión aún no es clara.

Otra evidencia es el rol del calentamiento de la superficie de la tierra trayendo viento de verano y lluvia a tierras áridas. Las temperaturas en tierra fluctúan más rápido que en las temperaturas del océano con una entrada de calor dada, y esto se observa en escala temporal de décadas, estaciones o incluso de días.

Un tercer factor es el incremento de la temperatura del aire en la atmósfera, que favorece la absorción de humedad. Este factor, el cuál se ha documentado suficientemente, hace predecir a los investigadores que la tasa de variación de la precipitación, así como la de evaporación se incrementará con la modificación del clima en la escala global. A escala regional también existirá un cambio pero aún no se puede hablar de este con certeza.

Estos tres aspectos sugieren un incremento en la intensidad de los monzones debido al cambio climático, sin embargo, los efectos se pueden predecir a gran escala, más no se ha logrado determinar sus efectos a escala regional (Lenart, 2005).

4.3 El monzón de Norteamérica y sus efectos sobre la cuenca del río Colorado.

La posición de la alta presión subtropical es clave para la duración y la intensidad de la estación monzónica. El anticiclón desplazado hacia el norte corresponde a una estación más húmeda, mientras que un desplazamiento hacia el sur lleva a una estación más seca debido a la interrupción de la advección de humedad en la región.

Algunos trabajos previos han estudiado la variabilidad de la circulación monzónica de escala sinóptica, sin embargo no había estudios acerca de las variaciones de la circulación con respecto a la cuenca baja del río Colorado.

McCann (2010) centró su estudio en el análisis de la variable “altura geopotencial”, la cual permite identificar sistemas de alta o baja presión en altura (alrededor de los 5,000 m de altura). Un sistema de alta presión en altura significa un sistema de tiempo severo en superficie. En base a esta asociación de sistemas en altura y superficie, el monzón se puede identificar en un mapa de altura geopotencial como un sistema de alta presión.

Se analizaron los mapas de altura geopotencial de los días de monzón (de julio 1 a septiembre 15) para el periodo de 1948-2008, tomados de estaciones dentro de la zona de la cuenca baja del río Colorado. El análisis consistió en clasificar los patrones de la circulación atmosférica (la posición del sistema de alta presión sobre la cuenca del río) dividiéndolos en 10 grupos según la zona donde se observaba el eje del sistema de alta presión. Tres zonas (oeste, centro y este) para el norte, tres para el centro, tres para el sur de la cuenca y una décima donde se observa un sistema de baja presión dominante, el cual inhibe las condiciones del monzón.

De los resultados obtenidos, el porcentaje de días en los que el sistema de alta presión se encuentra en la parte norte de la cuenca (oeste, centro y este juntos) suman casi el 64%.

Además, con la finalidad de un mejor entendimiento de la variabilidad temporal asociada al monzón, se realizó un análisis de las tendencias de la precipitación total en cuatro ciudades

dentro de la cuenca del río Colorado. Se realizó un análisis de regresión sobre la suma de eventos por año para establecer significancia estadística, así como la recurrencia de los eventos de precipitación intensa en esas estaciones mediante una distribución de Poisson y finalmente se ligó la precipitación monzonal diaria promedio de las cuatro ciudades a los patrones dominantes de la variabilidad de la altura neopotencial en 500 mb. Los resultados del estudio revelaron un aumento de las frecuencias de las precipitaciones intensas en las cuatro posiciones de las cuales, el más fuerte y sólo estadísticamente significativo incremento ocurrió en Las Vegas, Nevada.

Finalmente, en cuanto a la relación entre los patrones de circulación sinóptica y la precipitación diaria promedio en cada una de las ciudades consideradas en el estudio, mediante un análisis t-student se observaron fuertes variaciones en la precipitación entre los tipos sinópticos de la porción norte de la cuenca baja del río Colorado.

Aunque Mccann no se aventura en sus conclusiones y menciona que se deben hacer más estudios, sus resultados sugieren al menos que la zona de la cuenca en la que se observa mayor variabilidad en la lluvia asociada con el monzón es la parte alta de la cuenca del río Colorado, tal y como se observó en Las Vegas, cerca de la presa Hoover.

4.4 Análisis histórico del río Colorado y su futuro probable.

Estudios recientes del clima en el pasado y las condiciones del flujo han ampliado el entendimiento de la disponibilidad del agua a largo plazo en el río Colorado, revelando muchos periodos en los que hubo un flujo más bajo que en cualquier momento en los últimos 100 años de flujos registrados. Aún cuando la cuenca ha experimentado periodos húmedos y secos, el flujo del río y las condiciones atmosféricas se esperaba que volvieran a su estado "normal", definido por el clima de los primeros años del siglo XX. Sin embargo, reconstrucciones recientes basadas en los anillos de los árboles, demuestran que el flujo del río Colorado cambia en largos periodos decadales en los cuáles el flujo promedio es más bajo o más alto que el supuesto valor medio. Estas reconstrucciones refuerzan el punto de que el valor considerado como "valor promedio" en el río, es resultado sólo de un pequeño subconjunto del rango de la variabilidad hidroclimatológica natural en la cuenca del río a lo largo de varios siglos. En el futuro, la hidrología de la cuenca no puede basarse en un solo número. Esa información, junto con dos importantes tendencias -- un rápido crecimiento en las poblaciones urbanas en el oeste y un calentamiento del clima en la región-- requerirán que los administradores se preparen para posibles reducciones en los suministros de agua. El éxito de estos ajustes a las nuevas condiciones requerirán una fuerte y sostenida cooperación entre las muchas entidades involucradas en el manejo del agua en el río Colorado y los programas científicos (Bodman et al, 2008).

Hay algunos estudios que apuntan a un futuro donde más que preocuparse por problemas de inundación, en el futuro se debería pensar la dificultad para satisfacer las demandas de agua en la cuenca del río. Barnett y Pierce (2008) han mencionado que de acuerdo al cambio climático y a las actuales demandas de agua, la escorrentía del río Colorado tendrá reducciones importantes a tal grado que según ellos hay un 10% de probabilidad de que el lago Mead se seque en 2014 y un 50% de probabilidad de que para 2017 los niveles de agua en ese depósito sean tan bajos que no se pueda extraer energía hidroeléctrica de la corriente. Sin embargo, estas conclusiones las obtuvieron bajo el supuesto que los efectos del cambio climático iniciaron en 2007, contrario a lo que la mayoría de los investigadores piensan en cuanto a que el efecto de la actividad humana en el clima comenzó décadas antes. Así mismo, ellos tomaron datos acerca de la media del nivel del río para los últimos

100 años, aunque en otros estudios se ha concluido que en los últimos 500 años el flujo del río a sido aún menor que el actual.

En el apéndice U del reporte técnico presentado por la oficina para la Administración del Agua, del Departamento del Interior de los Estados Unidos (Brekke et al, 2007), acerca de los estudios de planificación para la cuenca del río Colorado, de acuerdo a los resultados de los modelos climáticos que estiman condiciones futuras del clima, indican una tendencia a un clima más seco, sobre todo en latitudes medias y regiones desérticas, y más húmedo en los trópicos y en latitudes altas. Sin embargo, las simulaciones del clima en el suroeste de los Estados Unidos han sido problemáticas debido a que la región es “corriente abajo” vista desde el Pacífico y también a que es un área con una topografía complicada que no ha podido ser bien simulada en los modelos climáticos. De igual manera, los modelos de circulación general no han podido simular adecuadamente la dinámica de las circulaciones tropicales y extra tropicales del océano Pacífico. La sutil dinámica de la corriente de chorro y la trayectoria de las tormentas invernales y la influencia del monzón de Norteamérica en el verano son también fenómenos importantes y tampoco están bien representados. Y el problema principal hasta ahora es que, no obstante los avances tecnológicos de los últimos años en cuanto a equipo computacional para hacer simulaciones de gran magnitud, hacerlas con una resolución espacial tan grande (del orden de 10 km o menos) aún resulta muy complicado y costoso. Y aún cuando se han probado modelos de otro tipo, como los hidrológicos, lo cierto es que aún es aventurado tener una idea clara de los cambios que ocurrirán en cuanto a la temperatura y la precipitación en la cuenca del río Colorado.

4.5 Datos de precipitación, nivel de las presas y flujo en el río Colorado.

La oficina del gobierno de Estados Unidos encargada de la administración del agua (Bureau of Reclamation), en el caso de la parte baja de la cuenca del río Colorado, tiene un sitio donde muestra el registro histórico del flujo en la ubicación actual de la presa Hoover. En la **Figura 5** se muestra el comportamiento del caudal para el periodo 1906-2006. Se pueden ver las grandes venidas o crecientes, antes de la construcción de la presa, la disminución en flujo durante el llenado de la presa en los años 30, y el periodo de descargas fuera de lo normal en la primera parte de la década de los 80's.



Figura 5. Flujo volumétrico para el periodo 1906-2006 corriente debajo de la presa Hoover. Datos tomados de <http://www.usbr.gov/lc/riverops.html>

La oficina del gobierno de los Estados Unidos para la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés) tiene diferentes conjuntos de datos

disponibles al público en diferentes páginas. Uno de estos sitios muestra los datos históricos de precipitación, asociada con el monzón, en algunas ciudades de Arizona y Nuevo México.

La siguiente gráfica (**Figura 6**) muestra los datos de precipitación para el periodo 1895-2010, promediados por quinquenios, para Phoenix y Tucson. En este periodo se observa que en Tucson se registraron precipitaciones intensas en el quinquenio 1906-1910 y en 1981-1985, años en los que se han registrado las últimas grandes inundaciones en el delta del río Colorado. El segundo pico coincide con la elevación en el flujo del río Colorado, aguas abajo de la presa Hoover. Este punto es interesante porque Tucson se ubica al sureste de Arizona y la presa Hoover se encuentra en el sureste de Nevada casi en la frontera noroeste de Arizona. Esto plantea una posible relación entre el incremento de la precipitación en Tucson (lado este del estado) y el incremento en el nivel del río Colorado, en un punto al otro lado del estado de Arizona (lado oeste).



Figura 6. Precipitación asociada al monzón para Tucson y Phoenix para el periodo de 1895-2010. Datos tomados de <http://www.wrh.noaa.gov/twc/monsoon/monsoon.php>

5. Conclusiones y alternativas de prevención.

La posibilidad está ahí. No obstante que el pronóstico de una disminución paulatina del flujo del río traiga como consecuencia problemas de tipo económico y social importantes y en un futuro cercano sea necesario plantear soluciones a este problema, también es cierto que eventos intensos de El Niño, pueden traer consigo cantidades mayores a lo normal de hielo en las Rocosas (Gutzler y Preston, 1997) y el consiguiente deshielo, o bien, la intensificación del monzón y por tanto, el incremento en la precipitación sobre la cuenca baja del río Colorado. Si bien es cierto que eventos como estos, cuyo periodo de duración es relativamente corto, no revertiría la tendencia hacia un clima más seco, si podrían causar serios problemas en el corto plazo, a diferencia de la sequía cuyos efectos podrían ser importantes en plazo mayor.

Un evento intenso de monzón combinado con un deshielo inusual en las Rocosas, o bien uno de esos dos eventos, podría generar un incremento en el cauce del río en el lado mexicano y esto se puede traducir en problemas serios.

De aquí la importancia de profundizar en el tema, buscando una mayor certeza, por ejemplo, en cuanto a qué tan intenso tendría que ser un evento de El Niño para generar un caudal en

el río que no fuera posible controlar con los diques que se encuentran actualmente delimitando el cauce.

Vale la pena seguir de cerca los avances que se tengan en la investigación que se desarrolla en cuanto al pronóstico del monzón americano dentro de los proyectos internacionales **VAMOS** y **CLIVAR**.

Finalmente, es importante también considerar algunos otros aspectos que pueden convertirse en factores de riesgo. Además de que Mexicali está en el antiguo delta del río Colorado, y por consiguiente, se expone al riesgo de una inundación por una descarga superior a lo normal en el río, existen dos factores más con diferentes escalas de tiempo.

a) La posibilidad de un sismo en el Golfo de California.

Las fallas tectónicas que corren sobre el sur de California se extienden bajo el golfo hasta la costa sureste de México. Un sismo con epicentro en el golfo podría generar un movimiento de olas en sentido sur-norte e inundar el delta del río en cuestión de minutos.

Otra posibilidad es que un sismo de gran magnitud en la falla de San Andrés pudiera dañar las presas o alguna de ellas y por consiguiente, poner en riesgo las zonas aguas abajo.

b) La posibilidad del aumento del nivel del agua por el deshielo de los casquetes polares.

Actualmente se habla del riesgo al que se exponen ciertas ciudades que se encuentran a la orilla del mar, debido al acelerado deshielo en las zonas de los casquetes polares. Se habla de que Nueva York, Río de Janeiro o Venecia podrían quedar bajo el agua en poco tiempo debido al deshielo y por encontrarse ubicadas casi al nivel del mar.

Aunque Mexicali está a unos 200 km del Golfo de California, el relieve entre la costa y la ciudad es prácticamente el mismo, e incluso hay zonas bajo el nivel del mar, tierra adentro, tales como el mar de Salton, en el sur de California, cuerpo de agua que se generó por la inundación de 1905. Así que aunque está podría ser una inundación lenta, también existe ese riesgo.

Fue muy comentado el caso de la ciudad de Nueva Orleans que por estar en una zona de huracanes contaba con un sistema de diques, el cual no funcionó debido a la falta de mantenimiento y la consecuencia fue que un sólo huracán en menos de 72 hrs dejó a la ciudad prácticamente destruida.

En el valle de Mexicali se cuenta con un sistema de diques para guiar el cauce del río, los cuáles en su mayoría fueron construidos hace casi 100 años. Diques que también deberían contener el agua del mar en caso de inundaciones ocasionadas por los sismos y posibles terremotos por las diversas fallas localizadas en la región o por el deshielo en los polos, previéndolo como una amenaza.

Un sistema de alarma para la casa o un seguro de auto se compra pensando en se pueda necesitar, no porque se esté seguro que ocurrirá un evento adverso. En el caso de la ciudad y el valle de Mexicali, es altamente recomendable debido a las características de esta región, una evaluación respecto a la eficiencia y funcionalidad del sistema de contención del agua del Río Colorado en su cuenca baja y también de las aguas del mar del Golfo de California.

6. Referencias

- Adams, D. K., Comrie, A. C.: The North American Monsoon; Bulletin of American Meteorological Society, pp. 2197-2213, Vol. 78. 1997.
- Barnett, T., Pierce, D.: Lake Mead Could Be Dry by 2021, Analysis of current and scheduled use and human-induced climate change sparks urgent warning from researchers at Scripps Institution of Oceanography, UC San Diego, 2008.
- Bodman, S.W., Gutierrez, Carlos M., Marburger III, J.H.: Our Changing Planet, The U.S. Change Science Program for Fiscal Year 2008, A report by the climate change science program and the subcommittee on global change research, pp. 58-73, 2008.
- Brekke, L. et al: Review of Science and Methods for Incorporating Climate Change Information into Reclamation's Colorado River Basin Planning Studies, Final Report, Bureau of Reclamation (Climate Technical Work Group), Departamento del Interior, E. U., 2007.
- Casafont, L. B.,: Las grandes presas del río Colorado; Revista de obras públicas, pp. 31-44, 1990.
- Fradkin, Philips A River No More The Colorado River and the West, Knopf (New York). ISBN 0394415795. Primera edición, 1981.
- García, J. L., Aragón, G. C.: De la vulnerabilidad a la producción del riesgo en las tres primeras décadas de la ciudad de Mexicali, 1903-1933, Región y Sociedad, Vol. XX, No. 41, 2008.
- Ghassemi, F., A. J. Jakeman, and H. A. Nix.. Salinisation of land and water resources: human causes, extent, management, and case studies. CAB International, Wallingford, Berkshire, England, 1995.
- Gochis, D. J., Brito-Castillo, L., Shuttleworth, W. J.: Hydroclimatology of the North American Monsoon Region in Northwest Mexico, Journal of Hydrology, pp. 53-70, Vol. 316, 2006.
- Gutzler, D. S., Preston, J. W.: Evidence for a relationship between spring snow cover in north America and summer rainfall in New Mexico, Geophysical Research Letters, Vol. 24, pp. 2207-2210, 1997.
- Kammerer, J.C.. "Largest Rivers in the United States". United States Geological Survey. <http://pubs.usgs.gov/of/1987/ofr87-242/>. Rev 2010.
- Lenart, M.: Monsoon could strengthen as climate warms, Broad-scale influences imply more summer rain, but many caveats apply, Southwest climate outlook, University of Arizona, 2005.
- Luecke, D. F. et al: El delta una vez más: Restaurando el hábitat ribereño y los humedales del delta del río Colorado, Environmental Defense Publications, 1999.
- McCann, J.: Synoptic circulation of the north american monsoon system and precipitation within the lower Colorado river basin, Tesis Master of Science, Faculty of the Louisiana State University and Agricultural Mechanical College. in The Department of Geography and Anthropology, 2010.
- Meade, A. W.: El valle de Mexicali, Universidad Autónoma de Baja California, 244p., 1996.
- Pitt, J., Can We Restore the Colorado River Delta? *Journal of Arid Environments* 49: 211-220, 2001.

Pontius, Dale. "Colorado River Basin Study:Final Report to the Western Water Policy Advisory Commission." Western Water Policy Advisory Commission,1997.

Samaniego López, Marco Antonio. El control del río Colorado como factor histórico: *La necesidad de estudiar la relación tierra/ agua. Frontera norte*, , vol.20, no.40, p.49-78. ISSN 0187-7372, Dic 2008.

Truebe, S.: The southwest monsoon under climate change: What the models tell (and don't tell) us, Southwest climate change network, 2010.

U. S. Geological Survey (USGS), Departamento del Interior de E. U.: Climatic Fluctuations, Drought, and Flow in the Colorado River Basin, 2004.

USGS, "Water-Data Report 2009; USGS 09380000 Colorado River at Lees Ferry, AZ"
United States Geological Survey. <http://wdr.water.usgs.gov/wy2009/pdfs/09380000.2009.pdf>.

7. Correspondencia:

Enriqueta Salazar Ruiz

Phone: 01526865804950

Fax: 01526865687803

E-mail : esalazar@itmexicali.edu.mx

URL :

Norman Edilberto Rivera Pazos

Phone: 01526869066828

Fax: 01526865687803

E-mail : nriverapazos@gmail.com

URL :