

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



**"Evaluación del impacto de las sequías en una cuenca semiárida y transfronteriza. Caso de estudio: La Cuenca del Río Tijuana."**

**Realizado por:**

**Ing. José Mizaél Ruiz Gibert**

**Directora de Tesis: Dra. Michelle Hallack Alegría**

**Mexicali, B. C.**

**Agosto de 2017**

Evaluación del impacto de las sequías en una cuenca semiárida y transfronteriza. Caso de estudio: La Cuenca del Río Tijuana.

**1. Introducción**

**2. Antecedentes**

**3. Marco Conceptual**

- 3.1. Ciclo Hidrológico
- 3.2. Precipitación.
- 3.3. Sequías
- 3.4. Indicadores de Sequía
- 3.5. Índice Estandarizado de Precipitación.
- 3.6. Índice Diferencial de Vegetación Normalizado.

**4. Justificación**

**5. Objetivos**

- 5.1. Objetivos Generales
- 5.2. Objetivos Específicos

**6. Metodología**

- 6.1. Modelación Hidrológica
- 6.2. Configuración de modelo
- 6.3. Datos Climatológicos
- 6.4. Calibración del modelo
- 6.5. Análisis de la sequía

**7. Resultados**

- 7.1 Evaluación del modelo
- 7.2 Periodos de sequía
- 7.3 Impactos Hidrológicos

**8. Conclusiones**

**9. Referencias**

## 1. Introducción

Una sequía se ha definido por diversos autores como la condición promedio a largo plazo del balance entre la precipitación y la evapotranspiración en un área definida, que a su vez también puede ser influenciada por fenómenos océano-atmosféricos (Dracup et al., 1980; Wilhite DA, 1985; Morales et al., 2012;). La principal causa de cualquier sequía es la ausencia de lluvia y, en particular, el tiempo, distribución e intensidad de esta ausencia en relación con el agua almacenada, la demanda y el uso (Milan Gocic, 2014).

La sequía es uno de los desastres naturales más costosos y recurrentes, causando grandes problemas a la economía y ecología. En 2012, en la región media oeste de Estados Unidos se estimaron daños provocados por sequías hasta los 12 billones de dólares esto principalmente proveniente del sector agrícola. (Huang, S et al, 2016; Henderson & Kauffman, 2012).

Además de estos problemas, la sequía afecta directa e indirectamente a la sustentabilidad social de una región o localidad en específico. Por ejemplo, la sequía puede causar daños en los cultivos, disminuyendo la productividad y aumentando los costos de producción, lo que lleva a los agricultores a tener pérdidas y esto pone en riesgo la seguridad alimentaria y entonces incrementa la pobreza de las localidades. (Lei, Yongdeng et al. 2016)

En este sentido, se espera que como parte de los efectos del cambio climático se empeore la presencia de fenómenos como sequías e inundaciones, y la prolongada exposición a esta amenaza afectara sobre todo a países en desarrollo (Xenarios S. et al. 2016).

Las sequías en los próximos años podrían ser más dañinas y frecuentes, con el incremento de la demanda de agua debido al crecimiento de la población, la disponibilidad de agua se verá limitada debido a estos cambios (Kim, H., et al, 2015).

A pesar del gran impacto al que las sequías conllevan tanto económicamente como ambientalmente, las acciones e investigaciones coordinadas de mitigación contra dicho fenómeno, en su mayoría, se dan posteriormente a la ocurrencia de algún evento de sequía en particular (Bonsal, Barrie R., et al 2011).

El cambio en los patrones climáticos es ahora reconocido como una de las mayores amenazas para el planeta en el siglo 21. De acuerdo con el Panel Intergubernamental en Cambio climático (IPPC, 2007), observaciones precisas en los últimos 157 años muestran que la temperatura de la superficies han incrementado globalmente, con algunas variaciones según la región.

Una cantidad considerable de investigaciones se han efectuado con la finalidad de cuantificar la severidad de una sequía, debido a que esta usualmente es medida dependiendo de su duración, intensidad o área afectada. (Kim, H., et al, 2015).

Por ejemplo, el PDSI (Palmer Drought Severity Index) desarrollado por palmer (1965) y el SPI (Standarized Precipitation Index) desarrollado por Mckee et al. (1993) son índices de referencia para el análisis de sequías. Actualmente más de 50 índices de sequía están disponibles en la práctica. (Kim et al., 2011).

Por lo tanto, es de gran importancia, incrementar los conocimientos que se tienen de la sequía y sus patrones, los cuales ayudan a mejorar las capacidades de adaptación a los cambios climáticos que se vienen presentando. (Osorio & Galianio, 2012).

En México, las sequías representan un alto riesgo, principalmente para la agricultura, ya que ésta es una de las principales fuentes de empleo e ingresos económicos del país (Ortega-Gaucin, 2013). Los impactos generan pérdidas para la economía regional y nacional. Según los diferentes organismos nacionales de 2011 a 2012 el país vivió la sequía más severa de los últimos 70 años (CONAGUA, 2012; SAGARPA, 2012).

Los modelos hidrológicos a escala regional y el análisis climático han mejorado en los últimos años, creando oportunidades para el desarrollo de una retrospectiva hidrológica para caracterizar l sequías pasadas (Correa et al., 2017)

Es difícil caracterizar eventos extremos hidrológicos históricos porque en general los registros de observación in situ están disponibles únicamente para las últimas décadas y sólo para algunas cuencas y ríos. Se han realizado mejoras en modelos hidrológicos capaces de simular procesos hidrológicos e hidráulicos de superficie y variabilidad y cambios relacionados con el uso de la tierra y el clima (Nijssen et al., 2001, Coe et al., 2008, Neal et al. 2012, Yamazaki et al., 2012, Alfieri et al., 2013, Karlsson et al., 2016). Las observaciones hidrológicas con sistemas de sensibilidad remota (Lettenmaier et al., 2015) y el análisis climático también han evolucionado en los últimos años. La fusión de modelos hidrológicos con estos nuevos conjuntos de datos podría proporcionar información de mejor cobertura espacio temporal y calidad para explorar el comportamiento hidrológico pasado (Nogués-Paegle et al., 2002)

Es importante comprender los impactos de las sequías sobre las condiciones hidrológicas en sistemas de bajo flujo a diferentes escalas temporales y espaciales, típicas de los climas semiáridos y mediterráneos (Brown et al., 2015). Varios modelos se han utilizado antes para evaluar los impactos de la sequía en diferentes cuencas en todo el mundo (Von Gunten et al 2016, Ahn et al 2016). En el noroeste de México, en una investigación de Molina-Navarro et al. (2016) se creó un modelo hidrológico para evaluar impactos de cambio climático utilizando la Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas mejor conocida como SWAT (Soil and Water Assessment Tool) por sus siglas en inglés, para evaluar los impactos del cambio climático en una cuenca semiárida.

## 2. Antecedentes

### 2.1 Área de Estudio: Cuenca del Río Tijuana.

La Cuenca del Río Tijuana (CRT) (Fig. 1) (4.532 km<sup>2</sup>), es una cuenca que se encuentra sobre la frontera internacional de los Estados Unidos de América y México. Tiene diversas formas de relieve y topografía que van desde el estuario en la desembocadura del Río Tijuana hasta las montañas cubiertas de pinos por encima de 1,829 m en las partes altas de la cuenca. Mesas costeras y varios amplios valles interiores que incluyen los de Tijuana, Alamar, Las Palmas y Tecate; Y el

altiplano y las montañas en el borde del este de la cuenca completa el cuadro de la topografía de la cuenca.

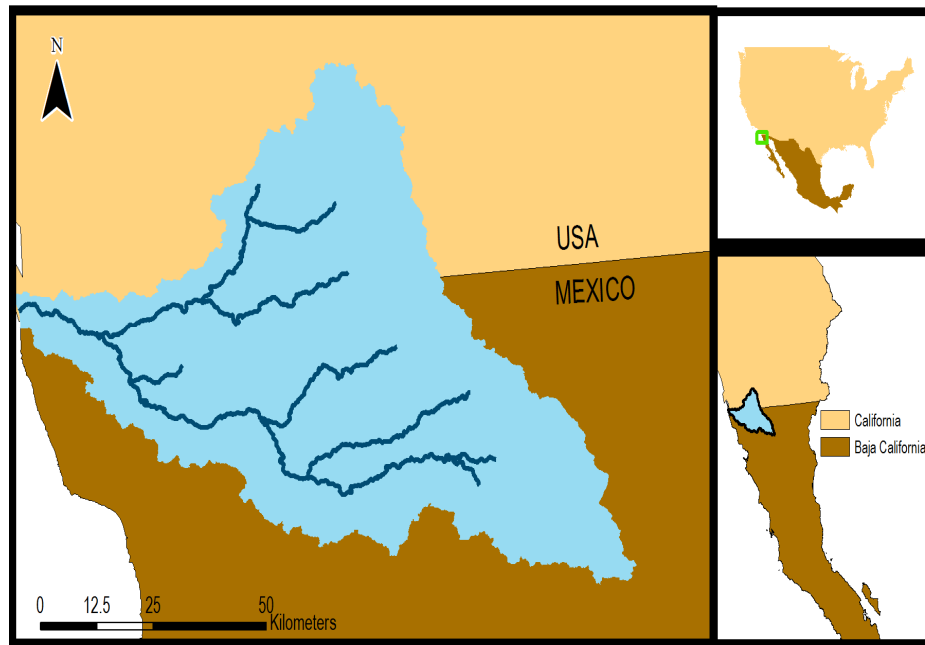


Figura 1. Cuenca del Río Tijuana

El estado de Baja California, al noroeste de México, se encuentra en una región semiárida, que según el informe del Programa de Acción para el Cambio Climático de Baja California (PEACC, 2012), es particularmente vulnerable al cambio climático. La CRT tiene un clima mediterráneo teniendo las precipitaciones más altas entre noviembre y marzo. Según la Comisión Nacional del Agua de México (CONAGUA), la Región Hidrológica donde reside el CRT tiene una de las tasas más bajas de recarga por infiltración de aguas subterráneas con una media de 1.249 mm<sup>3</sup> al año (CONAGUA, 2012).

La frontera internacional que atraviesa a la CRT separa la economía altamente desarrollada de San Diego de la de Tijuana. Se observan asimetrías económicas muy significativas a través de la frontera (De la Parra-Rentería et al., 2017). Algunos de los factores que se han identificado en la promoción del crecimiento urbano pasado en la Cuenca del Río Tijuana incluyen aumentos en las poblaciones migrantes de Michoacán, Sonora, Nayarit y Guanajuato en respuesta a la creación de empleo de las políticas de industrialización fronteriza nacionales. La escasa

inversión en infraestructura que empuja a las poblaciones hacia los bordes exteriores de las zonas urbanas, y la falta de aplicación de la ley que impida el cambio ilegal en el uso de la tierra (Ojeda et al., 2008)

Con creciente urgencia, las dependencias encargadas del manejo del agua están planeando una serie de medidas para extender el suministro existente en Baja California y crear nuevas fuentes, incluyendo plantas de desalinización, nuevos pozos y embalses, proyectos de revestimiento de canales y técnicas de riego mejoradas.

En 2015, la agricultura de California se enfrentaba a su cuarto año de sequía severa. Al igual que en 2014, los distritos de riego y los agricultores mostraban mayor resiliencia a las sequías de lo previsto. Así como los impactos económicos de la sequía han crecido desde el 2014, la prolongación de la sequía hasta 2016 o más allá con una intensidad similar probablemente erosione lentamente la producción agrícola y el empleo del estado (Howitt et al., 2015)

### 3. Marco Conceptual

El agua es uno de los cuatro elementos que el filósofo griego Aristóteles definió como constituyente del universo, junto con el aire, la tierra y el fuego. Es la sustancia más abundante que existe en la tierra y es el principal componente de todos los seres vivos. Constituye un factor decisivo en la climatización del planeta para la existencia humana, la formación de paisajes y en el progreso de los pueblos. Es un bien esencial para la vida y el desarrollo económico social de las naciones. Se trata de un recurso natural renovable que puede tornarse escaso con el crecimiento y desarrollo de la población, las industrias y la agricultura.

#### 3.1 El ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico está compuesto por diferentes variables, las cuales se relacionan entre sí por medio de los procesos hidrológicos. En general, se entiende por proceso a una serie de acciones que producen un cambio o desarrollo en un sistema y para el caso particular de la Hidrología, los procesos están asociados con aquellos fenómenos que intervienen tanto en el movimiento del agua como en los cambios que sufre ésta en sus características físicas, químicas y biológicas al desplazarse por diversos medios.

El ciclo hidrológico se puede representar como un sistema, es decir, como una estructura o volumen en el espacio, delimitada por una frontera, cuyos componentes internos interactúan entre sí o con otros sistemas adyacentes (Chow et al, 1988). Los componentes del sistema serán las variables hidrológicas y los procesos que las relacionan entre sí; los sistemas adyacentes serán aquellos que tienen como límites comunes las capas altas de la atmósfera y los sistemas geológicos profundos. Al considerar una escala a nivel planeta, el ciclo hidrológico se denomina global. Este sistema global se puede subdividir en tres: en un subsistema atmosférico, en un subsistema de agua superficial y en un subsistema de agua subterránea. En cada subsistema se presentará una capacidad de retención de volúmenes de agua, en cualquiera de sus fases, durante un determinado intervalo de tiempo. La capacidad de retención en un medio también recibe el nombre de almacenamiento y el intervalo de tiempo que permanece un volumen recibe el nombre de tiempo de residencia.

El agua proveniente de la precipitación (en estado sólido y/o líquido) sigue distintos caminos cuando llega a la superficie terrestre en función de las características edáficas, topográficas, fitográficas, urbanas, etc. Puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el terreno (escurrimiento superficial) o infiltrarse en el suelo dando lugar a la formación de acuíferos (aguas subterráneas) que, eventualmente gracias al escurrimiento subterráneo, alimentan ríos, lagos, humedales o descargan directamente en el mar. El ciclo hidrológico es

el fenómeno de circulación global del agua producido fundamentalmente por la energía solar, e influenciado por las fuerzas de gravedad y la rotación de la Tierra.

### **3.2 Precipitación**

La lluvia, el granizo y la nieve se forman dentro de la misma tormenta. El que las gotas de lluvia se desplacen hacia la superficie, tiene que ver con el tamaño; en el caso del granizo, los cristales de hielo son arrastrados por las fuertes corrientes verticales ascendentes, provocando con ello, un aumento de tamaño por la colisión con otros núcleos, hasta que el peso es tal que la atracción gravitacional es mayor que el empuje por la influencia de la corriente ascendente. En el caso de la nieve, los copos nacen cuando las gotas de agua atraviesan una capa de aire frío que presenta una temperatura por debajo de los 0° C y se encuentra cercana a la superficie del terreno. En la mayor parte del territorio nacional la precipitación corresponde a la pluvial; sin embargo, en el altiplano las heladas, y en el 57 norte la caída de nieve (caso especial son las montañas más altas, que permanentemente están cubiertas de nieve), son formas de precipitación relevantes desde el punto de vista regional. En general, los factores geográficos y geofísicos determinan las condiciones del clima y de la lluvia en las diversas regiones geográficas.

La medición de la cantidad de agua caída en una zona se realiza por medio de un instrumento que se llama pluviómetro y se registra con los pluviógrafos. Se expresa en lámina de agua, comúnmente en milímetros (mm). Todos los pluviómetros de una misma región deben estar instalados de manera comparable, evitando que el agua se pierda hacia el exterior del instrumento por salpicaduras, por efecto del viento o por evaporación. Existen normas internacionales para el emplazamiento de estos dispositivos, por lo que su instalación, control y mantenimiento debe ser realizado por técnicos especializados.

### **3.4 Sequías**

En las últimas décadas, a la variabilidad natural del clima se ha sumado la influencia de las actividades antropogénicas en el cambio del clima con diversos efectos ambientales y socioeconómicos. El cuarto Informe de Evaluación de Cambio Climático (CC) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2007) reporta que algunos de los efectos del cambio climático se traducirán en cambios en la distribución de las precipitaciones y en la ocurrencia e intensidad de los huracanes y las sequías (Márdero., et al., 2012)

La sequía es un fenómeno asociado a la variabilidad natural del clima, que se produce cuando en un lugar determinado la cantidad de precipitación es inferior a la media climatológica de largo plazo durante un periodo prolongado. A diferencia de la aridez, que es una característica permanente, la sequía es un estado transitorio. Cuando esta condición persiste, el aporte pluviométrico puede llegar a ser insuficiente para cubrir las demandas hídricas de un grupo social (Vicente-Serrano et al., 2012).

La sequía se percibe como uno de los desastres naturales más costosos y menos entendidos, dada la dificultad para definir su comienzo y fin, su lento desarrollo y las múltiples facetas que posee a nivel regional. A esto se suma la gran cantidad de índices existentes en la literatura que posibilitan su monitoreo, los cuales brindan numerosas definiciones que suelen confundir a los encargados de la planificación agrícola y de los recursos hídricos (Rivera, J. A. 2014).

Tres parámetros caracterizan las sequías: i) la intensidad, referida al déficit de precipitación; ii) la duración, o tiempo en el cual persiste la condición seca; y iii) la extensión, se refiere al área afectada por la escasez de lluvia. La intensidad suele

medirse en términos de la desviación de los aportes respecto a una pauta de precipitación considerada normal. A partir de la intensidad se pueden estimar su duración y extensión superficial (Cruz, G., et al., 2014)

Existe la percepción entre productores y técnicos del sector ganadero que las sequías se han incrementado en los últimos años. Estimaciones recientes señalan que el impacto negativo de la sequía 2008/2009 fue mayor en el conjunto de los sectores económicos y factores de producción que en el propio sector ganadero (Cruz, G., et al., 2014)

En una zona seca, es evidente que la escasez de agua procede principalmente de la falta de lluvia, o de una menguada o disminuida precipitación. Además, la eficacia del agua en el suelo depende de numerosos factores terrestres, entre los que destaca la evaporación (Mercado et al., 2010). Distintos autores utilizan conceptos variados para definir la aridez climática, por ello no existe una clara y exacta definición de aridez.

La sequía se considera un fenómeno extremo progresivo en el tiempo. Sus efectos suelen acumularse lentamente sobre un período de tiempo considerable y pueden persistir por varios meses una vez finalizado el evento. La escala de tiempo sobre la cual se acumulan los déficits de la precipitación es extremadamente importante y funcionalmente separa diferentes tipos de sequías. Las sequías generalmente se clasifican en cuatro categorías: meteorológica, agrícola, hidrológica y socio-económica.

La sequía meteorológica es el período de tiempo –en general de meses a años con precipitación por debajo de los niveles normales para una región en particular. Este tipo de sequías precede y causa otro tipo de sequías, que como consecuencia

directa de los déficits en la precipitación, se obtienen disminuciones en la humedad de suelo y la escorrentía superficial. La sequía meteorológica es un evento natural resultante a partir de varios factores, los cuales difieren a nivel regional.

La sequía agrícola se refiere usualmente al período con mermas en la humedad del suelo y la consecuente pérdida de las cosechas sin ninguna referencia a los recursos hídricos superficiales. Una disminución en la humedad del suelo depende principalmente de la diferencia entre la evapotranspiración actual y la evapotranspiración potencial. La demanda de agua de las plantas depende de las condiciones meteorológicas imperantes, de las características biológicas de cada planta, de su etapa de crecimiento y de las propiedades físicas y biológicas del suelo. Este tipo de sequías afecta especialmente los sistemas agrícolas y ganaderos en condiciones de secano (Iglesias et al., 2009).

Para el estudio de las sequías agrícolas se han desarrollado numerosos índices basados en la combinación de la precipitación, temperatura y humedad de suelo, entre otras variables. La sequía hidrológica se vincula a los períodos con recursos hídricos superficiales y sub-superficiales inadecuados para los usos de agua establecidos de un dado sistema de manejo de recursos hídricos.

La sequía hidrológica se desarrolla más lentamente dado que involucra el agotamiento de agua almacenada en acuíferos y reservorios. Este tipo de sequías puede originar escasez de agua, condición que a menudo es definida como sequía operacional (Iglesias et al., 2009). Son escasas las investigaciones relacionadas con la ocurrencia y propagación de sequías en los recursos hídricos sub-superficiales (Mishra y Singh, 2010). A nivel sub-superficial, la primer componente en ser afectada es la recarga de los acuíferos, luego disminuye su nivel y por último su descarga. El nivel de los acuíferos normalmente se ve afectado no solo por la

disminución en la precipitación, sino además por la sobre-explotación para satisfacer el consumo.

Una revisión del rol de los recursos hídricos subsuperficiales durante la ocurrencia de sequías puede encontrarse en Casado Saénz et al. (2009). La interacción entre el agua superficial y el agua sub-superficial usualmente es ignorada debido a que esta conexión es difícil de observar y medir, y, por lo tanto, aún más difícil de considerar en la política. Dada esta dificultad, para el estudio de las sequías hidrológicas comúnmente se utilizan indicadores derivados de mediciones de caudales superficiales en distintas escalas de tiempo.

La sequía socio-económica difiere marcadamente de los otros tipos de sequía y se produce cuando la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de producir daños (económicos o personales) a la población de una región afectada por la escasez de lluvias. Los índices utilizados para caracterizar las sequías socio-económicas son principalmente monetarios.

### **3.4 índices de sequía**

Los indicadores de sequía están relacionados con cientos de datos de precipitación, nieve, caudales de los ríos e indicadores de suministro de agua. En general, no se utiliza un único indicador para caracterizar la sequía en una zona.

Es conveniente puntualizar que, en la mayoría de los casos, no se utiliza un solo indicador, sino varios a la vez, para conseguir una mejor caracterización de la

sequía en una zona determinada. Aunque ninguno de los indicadores principales es, en todas las circunstancias, intrínsecamente superior a los demás, sí es cierto que, para algunos casos, son mejores unos indicadores que otros.

Por ejemplo, El Indicador de Intensidad de la Sequía de Palmer se ha utilizado mucho en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos para determinar cuándo se debe conceder ayudas de socorro para la sequía; pero el Indicador Palmer se adapta mejor a zonas muy extensas, con topografía uniforme. Los estados del oeste de los Estados Unidos, que tienen un terreno montañoso y, por ello, unos microclimas regionales muy complejos, prefieren complementar el Indicador de Palmer con otros indicadores, como es el Indicador de Suministro de Aguas Superficiales, que tiene en cuenta la masa de nieve y otras condiciones únicas.

#### 3.4.1 Índice Estandarizado de Precipitación, SPI

El índice SPI es una herramienta simple, fácil de calcular y estadísticamente relevante y significativa, que permite medir en distintas escalas temporales a la sequía; estas escalas de tiempo reflejan el impacto de la sequía sobre la disponibilidad de los diferentes recursos de agua. Una de sus características más interesantes es que asigna un valor numérico a las precipitaciones, el cual se puede comparar con valores de todas las regiones, incluso con climas marcadamente diferentes.

Es igual de eficaz para analizar tanto los periodos secos como los periodos húmedos y tiene como único parámetro de entrada a la precipitación. El cálculo SPI para cualquier ubicación se basa en el registro de precipitación a largo plazo para

un período deseado. Este registro a largo plazo se ajusta a una distribución de probabilidad, que se transforma, entonces, en una distribución normal; de modo que la media de SPI para la ubicación y el periodo deseado es cero (Reyes, C., et al 2015)

Es un indicador basado en la probabilidad de lluvias, en cualquier período de tiempo. Fue desarrollado, en 1993, por McKee et al., para cuantificar el déficit de precipitaciones durante múltiples periodos de tiempo. Estos periodos reflejan el impacto de la sequía sobre la disponibilidad de los diferentes recursos hídricos. Las condiciones de humedad del suelo responden a las anomalías pluviométricas en un intervalo de tiempo relativamente corto, mientras que el agua subterránea, el caudal de los cursos superficiales y el agua embalsada reflejan tales anomalías a largo plazo, razón por la cual, originalmente, el SPI se calculaba para periodos de tiempo de 3, 6, 12, 24 y 48 meses.

El cálculo del SPI para cualquier lugar se basa en los registros de precipitaciones a largo plazo durante el periodo deseado. Este registro de datos a largo plazo se ajusta a una distribución de probabilidad que entonces se transforma en una distribución normal, de manera que el SPI medio, para el lugar y período deseado, sea cero. Los valores positivos o negativos del SPI indican que las precipitaciones son, respectivamente, mayores o menores que la media. Dado que el SPI está normalizado, los climas más húmedos y más secos se pueden representar de la misma forma y, con el uso de este indicador, también se puede hacer el seguimiento de los periodos húmedos.

Los valores del SPI se clasifican como sigue:

Valores del SPI Interpretación:

2,0 o superior humedad extrema

- 1,5 a 1,99 muy húmedo
- 1,0 a 1,49 humedad moderada
- 0,99 a 0,99 casi normal
- 1,0 a -1,49 moderadamente seco
- 1,5 a -1,99 muy seco
- 2,0 o por debajo sequedad extrema

Una sequía se produce siempre que el SPI sea permanentemente negativo y alcance una intensidad de  $-1,0$ , o menor; el fenómeno finaliza cuando el SPI se hace positivo. Cada fenómeno de sequía, por lo tanto, tiene una duración definida por su comienzo y su final, y una intensidad diferente para cada mes que dure el fenómeno. La magnitud de la sequía puede también ser la magnitud acumulada de la sequía, es decir, la suma de todos los valores positivos del SPI durante los meses que ésta dura. Las ventajas de este indicador son: que el SPI se puede calcular para diferentes periodos de tiempo, que da una señal de alerta temprana de la sequía, que ayuda a valorar la intensidad de la misma y que es menos complejo que el Indicador de Palmer. La desventaja es que los valores del SPI se basan en unos datos previos, que pueden cambiar.

### 3.4.2 Índice ..... NDVI

Las imágenes de teledetección pueden utilizarse para el análisis de procesos breves, por ejemplo, para el seguimiento del ciclo de crecimiento de los cultivos y la evaluación de los rendimientos de una cosecha. Se estudian con este propósito las imágenes de satélite captadas en diversas etapas del ciclo de cultivo para un único año: la preparación del suelo, la siembra, el establecimiento de la planta, el

crecimiento activo, la floración, la fructificación y la translocación de nutrientes o la maduración de los frutos y la cosecha.

Existen diversas metodologías para estudiar mediante imágenes satelitales la vegetación; uno de ellos es la aplicación de índices vegetativos relacionados con el verdor (Chuvienco, 1998). El NDVI mide la relación entre la energía absorbida y emitida por los objetos terrestres. Aplicado a las comunidades de plantas, el índice arroja valores de intensidad del verdor de la zona, y da cuenta de la cantidad de vegetación presente en una superficie y su estado de salud o vigor vegetativo. El NDVI es un índice no dimensional, y por lo tanto sus valores van de  $-1$  a  $+1$  (Tovar, C. M. 2012).

En la práctica los valores por debajo de 0.1 corresponden a los cuerpos de agua y a la tierra desnuda, indicadores de la actividad fotosintética, la selva y la actividad agrícola (Yengoh, G., et al., 2015)

El utilizar estos índices tiene su fundamento en el particular comportamiento radiométrico de la vegetación. Una cubierta vegetal en buen estado de salud, tiene una firma espectral que se caracteriza por el contraste entre la banda del rojo (entre  $0.6$  y  $0.7 \mu\text{m}$ .), la cual es absorbida en gran parte por las hojas, y el infrarrojo cercano (entre  $0.7$  y  $1.1 \mu\text{m}$ .), que es reflectada en su mayoría. Esta cualidad de la vegetación permite la realización de su valoración cualitativa (Klisch A., et al., 2015). El Índice de Vegetación Diferencial Normalizado se calcula mediante la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{(IRC - R)}{(IRC + R)}$$

Donde IRC es la reflectividad en el infrarrojo cercano y R es la reflectividad en el rojo.

#### 4. Justificación

En los últimos años se ha experimentado un periodo de sequía en los estados de Baja California y California. De acuerdo con el Monitor de Sequía de América del Norte (NADM) a finales de agosto de 2016, la sequía de moderada a excepcional (D1-D4) afectó aproximadamente al 10.0% de la superficie y el 21.6% de la población de América del Norte. De acuerdo con el Monitor de Sequía de México (MSM) y de EE.UU. se puede decir que la CRT presenta condiciones de sequía extrema, como consecuencias se presentan pérdidas mayores en cultivos y pastos, el riesgo de incendios forestales es extremo, se generalizan las restricciones en el uso del agua debido a su escasez.

Ante los problemas de sequía que se presentan en la región, autoridades estatales preparan una iniciativa de reformas a la Ley Estatal del Agua que contempla acciones para racionalizar el suministro, ajustes tarifarios, y sanciones económicas, administrativas o penales, en contra de quienes desperdicien el vital líquido. La nueva Ley también regulará el uso de fuentes alternas para el suministro de agua potable, al ser aprobada dicha ley entraría en vigor para el año fiscal 2017 (UNIMEXICALI noticias, 2016)

Los principales efectos de este fenómeno se dan en los terrenos forestales, agricultura y ganadería, con graves consecuencias socioeconómicas a la población

rural y urbana (CONAGUA). Por ejemplo, los campesinos ya empiezan a tener problemas con la falta de agua provocada por la sequía que se registra en California y en el norte de México desde hace más de 30 meses (Bautista, 2015). En Baja California ha muerto una parte importante del ganado por la sequía, de acuerdo con la Unión Ganadera Regional el inventario de ganado cayó un 30% del 2011 a mayo del 2016 (Ávalos, 2016). De las 320 mil cabezas de ganado que son sacrificadas en Baja California solamente 10 mil son criadas en el estado, debido a que la escasez de agua impide el crecimiento de la producción ganadera (Valladolid en Martínez, 2016). Además, el aumento probable de temperatura podría traer consigo un aumento en el estrés calórico del ganado (Diagnóstico Sectorial Baja California). En cuestión forestal, según la CONAFOR en el 2003, se reportaron afectaciones por sequía en bosques de pino piñonero en estados como Baja California, Hidalgo y Nuevo León incrementando el ataque por descortezadores en 14 mil hectáreas.

SWAT ha sido utilizado con éxito para simular la cantidad de agua en una amplia gama de escalas y condiciones ambientales (Schuol et al., 2008) y para evaluar diversos tipos de sequía, incluyendo sequía meteorológica, agrícola e hidrológica (Wang et al., 2011). Es posible que los modelos hidrológicos puedan ser la base para evaluar las condiciones de sequía a través del desarrollo de múltiples índices de sequía, mitigación y estrategias de manejo (Narasimhan y Srinivasan, 2005).

A la fecha no existen documentos donde se haya elaborado un estudio o modelo de la CRT con la finalidad de evaluar los impactos de la sequía sobre la misma.

El modelo permitirá cuantificar el impacto que han tenido sequías de diferentes duraciones e intensidades sobre diferentes variables del ciclo hidrológico y las repercusiones que esto conlleva. El modelo una vez calibrado podrá ser utilizado para evaluar futuros escenarios creados a partir de diversos modelos de cambio climático.

#### **4. Objetivos**

##### **5.1 Objetivo General.**

Desarrollar un modelo hidrológico para la cuenca del Río Tijuana utilizando SWAT para evaluar los impactos de diferentes periodos de sequía.

## 5.2 Objetivos Específicos

1. Identificar los periodos de sequía que han impactado la región de la CRT utilizando un índice basado en precipitación y otro basado en percepción remota.
2. Evaluar la aplicación de datos climatológicos provenientes del Sistema de Asimilación de Datos Terrestres de Norte América (NLDAS) sobre la zona de estudio.
3. Elaborar, Calibrar y Validar un modelo hidrológico de la CRT utilizando SWAT que logre simular satisfactoriamente los procesos que ocurren dentro de la cuenca.
4. evaluar el impacto en el balance hídrico de la cuenca durante los periodos identificados y las repercusiones que tienen dichas variaciones.

## 6. Metodología

### 6.1 Elaboración del Modelo SWAT

SWAT es un modelo hidrológico semi-distribuido a escala de cuenca que fue desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-ARS) para simular la cantidad y calidad del agua superficial y subterránea. Con el fin de representar la heterogeneidad espacial, una cuenca se divide inicialmente en subcuencas, y luego cada subcuenca se subdivide en unidades de respuesta hidrológica (HRU). Esta caracterización física de la cuenca se logra describiendo los tipos de suelos, la elevación, la pendiente y el uso o cobertura del área de la cuenca.

Con el fin de predecir flujo utilizando SWAT, es necesario recopilar un gran número de parámetros de entrada y conjuntos de datos. El modelo SWAT requiere tres componentes: (1) la descripción física de la cuenca; (2) datos meteorológicos para forzar los componentes del ciclo hidrológico dentro de la cuenca; Y (3) parámetros hidrológicos.

El método de Penman se utilizó para estimar la evapotranspiración potencial (PET). La ecuación de Penman se define como

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)}$$

Donde  $ET_o$  es la evapotranspiración potencial (mm / d),  $R_n$  es la radiación neta en la superficie del cultivo,  $G$  es la densidad del flujo de calor del suelo,  $T$  es la temperatura media del aire a 2 m de altura,  $u_2$  es la velocidad del viento a 2 m de altura,  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación,  $\gamma$  es el coeficiente psicrométrico mientras que  $e_s$  y  $e_a$  son la saturación y las presiones de vapor reales.

El escurrimiento superficial se calculó con el procedimiento de número de la curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, que se seleccionó en el modelo. La simulación se montó y se llevó a cabo durante todo período de tiempo con datos climáticos disponibles (1979-2016), los primeros 5 años (1979-1983) se utilizaron como calentamiento para el modelo, por lo tanto, los resultados de simulación están disponibles entre 1984 y 2016.

## 6.2 Configuración del modelo

Utilizando el módulo de interfaz libre QGIS de SWAT QSWAT, las subcuencas se dividen en unidades de respuesta hidrológica (HRU), que se caracterizan por una combinación dada de uso del suelo, tipo de suelo y pendiente. La base para la delineación de cuencas hidrográficas y la creación de subcuencas es el modelo de elevación digital (Fig. 2) (Zedeh et al., 2017).

Basado en los datos digitales de elevación de la Misión del Transbordador de Radar de Topografía (SRTM) de la NASA con una resolución de celda de  $90 \times 90$  m (Jarvis et al., 2014), la delimitación de la subcuenca fue suficientemente detallada para captar variabilidad topográfica apreciable dentro de la cuenca. El número de subcuencas elegidas para simular toda la cuenca dependía del detalle espacial de los datos de entrada disponibles y de las recomendaciones dadas por Jha et al. (2004) con respecto a la sensibilidad de SWAT a la subdivisión de cuenca en los

resultados de flujo. Además del modelo de elevación digital, SWAT delinea subcuencas con entradas y salidas especificadas por los usuarios. Estos puntos pueden ser reservorios o puntos de datos observados que serán utilizados para la calibración en una etapa posterior. Para este modelo, se utilizó la estación hidrométrica ubicada en el Río Tijuana de la Comisión Internacional de Límites y Aguas CILA como salida final de la cuenca y los datos se utilizaron para la calibración y validación (Fig. 3).

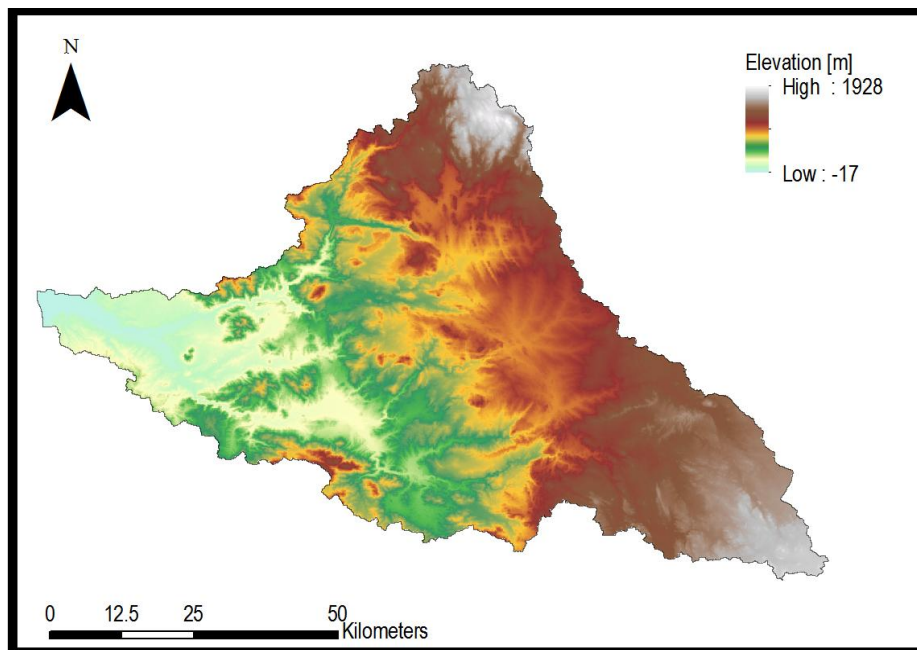


Figura 2. Modelo de Digital de Elevación

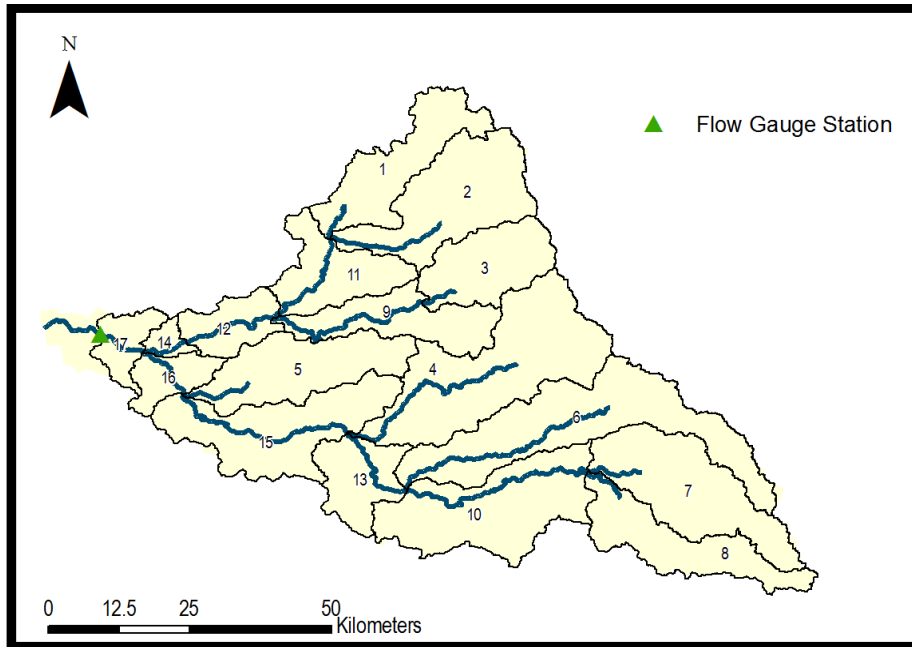


Figura 3. Delimitación de la cuenca

Las HRU (unidades de respuesta hidrológica) se definieron en función de la cobertura del suelo, tipo de suelo y pendiente. Es uso de suelo (Fig. 4) se obtuvo de la Caracterización global de la cobertura terrestre de la USGS (Fig-5), tiene una resolución de 400 m y una clasificación de 19 tipos diferentes de cubierta terrestre. Los datos del suelo para la generación de HRU se obtuvieron del proyecto WaterBase de la Universidad de las Naciones Unidas y se basa en el Mapa Digital de Suelos de la FAO del mundo (Leon et al., 2006). Los datos del suelo consistieron en dos capas con una resolución de 4 X 4 km e incluyeron todos los atributos requeridos para realizar la simulación SWAT.

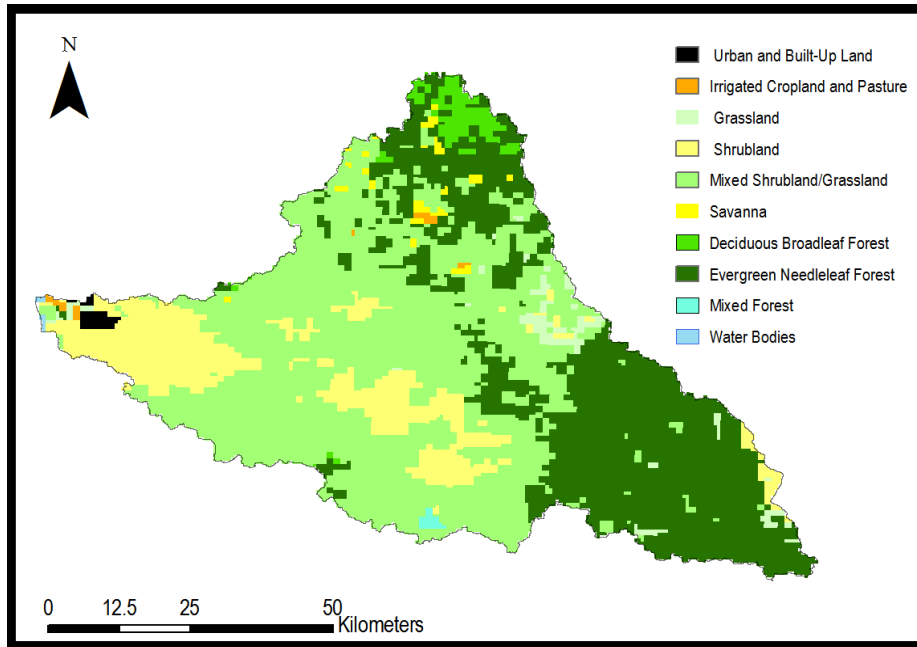


Figura 4. Cobertura de uso de suelo

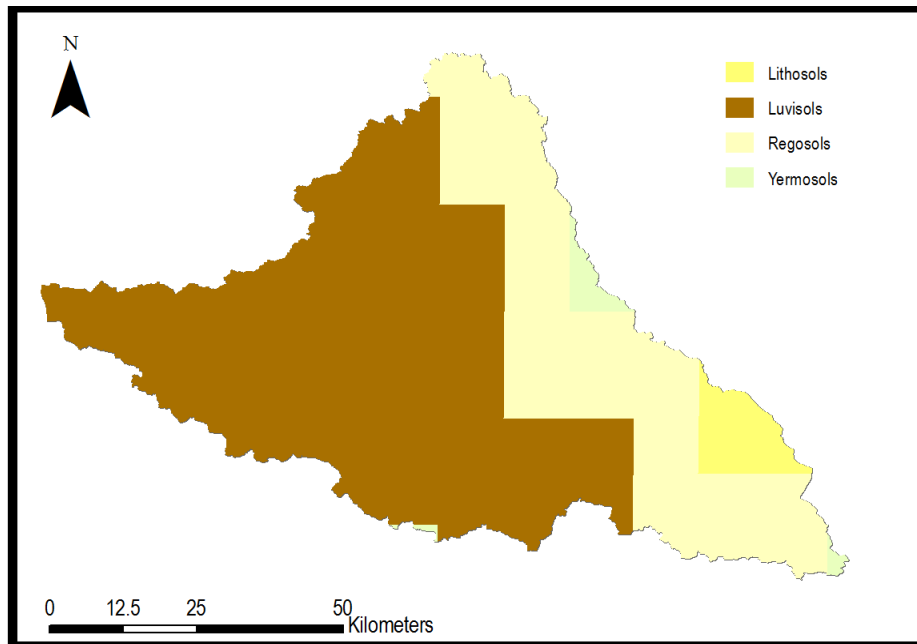


Figura 5. Caracterización del tipo de suelo

### 6.3 Datos Climatológicos

Los resultados de la simulación de flujo son más impactados por los datos meteorológicos de entrada y los parámetros de calibración que por las características físicas de las cuencas hidrográficas. Los datos meteorológicos para un modelo hidrológico son quizás el parámetro más crítico para predecir el caudal o el flujo de agua (Corona et al., 2014).

Normalmente, las precipitaciones se obtienen de las estaciones meteorológicas locales administradas por agencias federales, estatales y locales, pero a menudo esos conjuntos de datos están incompletos debido a valores faltantes asociados con errores sistemáticos y / o errores aleatorios (Kim & Ryu, 2015). Las observaciones hidrológicas son únicas en el espacio y en el tiempo. Si no se observan en un lugar y tiempo determinados, los valores sólo pueden ser estimados (Bardóssy y Pegram, 2014). Las estimaciones de precipitaciones por satélite proporcionan una fuente de datos potencialmente atractiva para la hidrología superficial, particularmente para captaciones grandes y mal instrumentadas.

Debido a la falta de estaciones meteorológicas y la escasa naturaleza de las series de datos en la región del CRT, se utilizó la precipitación y la temperatura del Sistema Norteamericano de Asimilación de Datos Terrestres (NLDAS) (Mitchell et al. 19xx). Es un modelo de forzamiento atmosférico de superficie terrestre que cubre los Estados Unidos en una cuadrícula de resolución de 1/8 de grados decimales. Los datos de precipitación y temperatura por hora se descargaron del sitio web de NLDAS durante el período 1979 a 2016.

NLDAS como datos de entrada para la modelización se han utilizado antes en México, Robles-Morua et al. 2014 comparó 3 modelos usando estaciones meteorológicas, datos NLDAS y datos ajustados NLDAS, resultando en NLDAS ADJ proporcionó las variaciones espaciales más atractivas en la precipitación.

Se realizó un análisis del sistema de información geográfica para definir el área del dominio NLDAS a procesar. Se calcularon datos diarios representativos del centro del píxel 1/8 (~ 12km), obteniéndose una serie diaria de precipitación (mm), temperatura máxima (C °) y temperatura mínima (C °) para un total de 58 píxeles (Fig. 6). Los datos fueron extraídos y procesados como lo requiere SWAT.

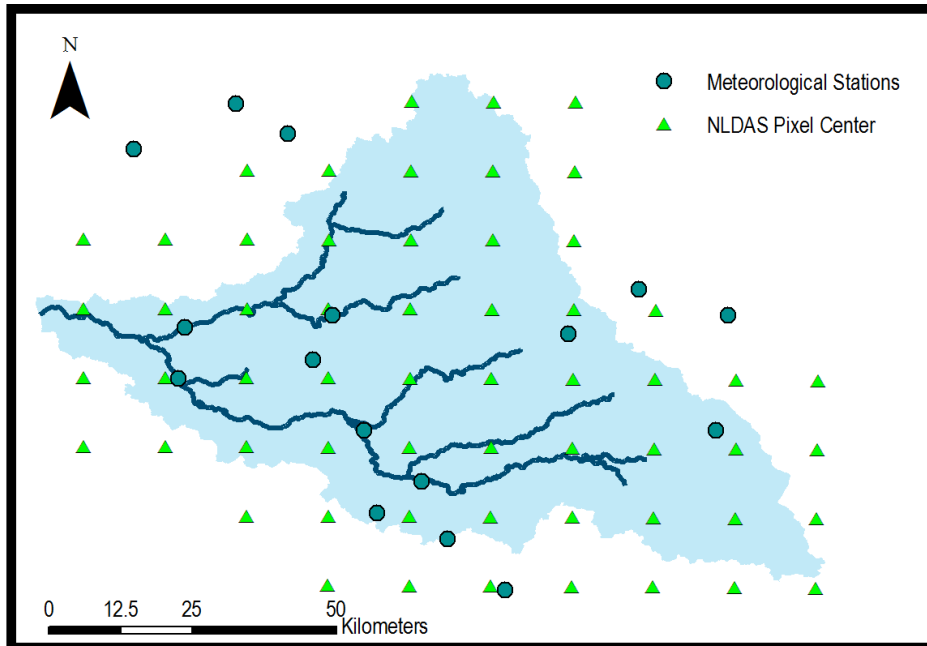


Figura 6. Estaciones Meteorológicas y Píxeles de NLDAS

Los campos NLDAS fueron comparados y ajustados, con las observaciones de tierra de la estación meteorológica en la cuenca de estudio antes de la aplicación del modelo, como sugiere Luo et al. (2003) y Pinker et al. (2003). Este ajuste se realizó aplicando la proporción promediada del factor multiplicativo de las medias (RM) de Steiner et al. (1999). Aquí se obtuvo RM

$$RM(j) = \frac{\sum_{i=1}^N g_i(j)}{\sum_{i=1}^N P_i(j)}$$

Donde N es el número de medidores o estaciones meteorológicas (i) y los píxeles correspondientes y  $g_i(j)$  y  $p_i(j)$  son precipitaciones diarias. Los datos ajustados de NLDAS se obtuvieron aplicando los factores multiplicativos diarios, RM (j), a los datos de precipitación. La Figura 7a muestra la distribución espacial de la media anual de precipitación (MAP) de las estaciones meteorológicas Kriging técnica de

interpolación con la asistencia de un sistema de información geográfica. La Figura 7b representa los datos del MAP del NLDAS antes de ser ajustados y la Figura 7c es los datos NLDAS finales que se utilizarán en el modelo SWAT, como se observa, el mapa NLDAS ajustado representaba mejor la variabilidad espacial de la precipitación.

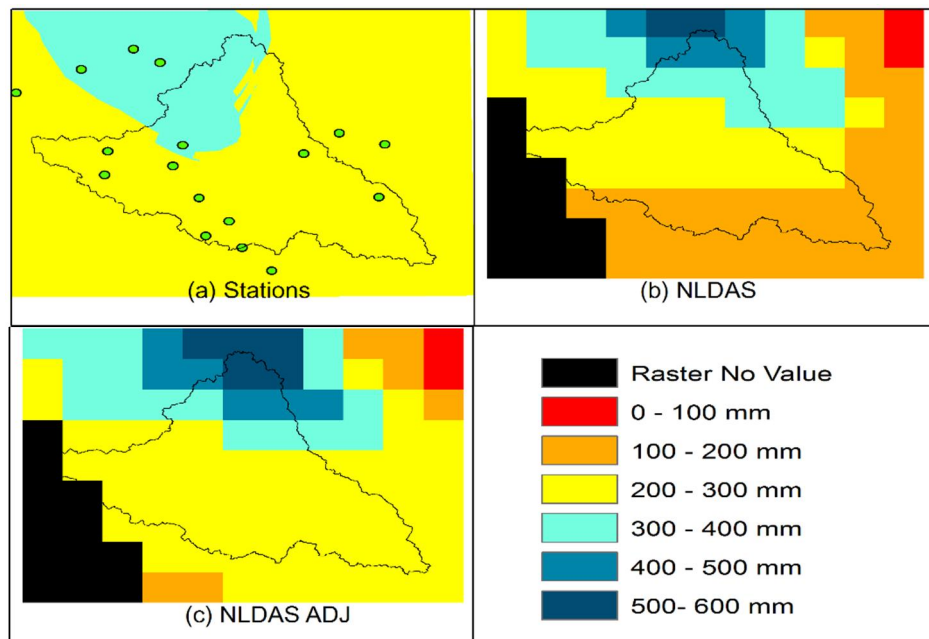


Figura 7 (a) Distribución espacial del MAP con estaciones meteorológicas, (b) Distribución espacial del MAP de la LMDNA, (c) Distribución espacial del PAM ajustada por el NLDAS

#### 6.4 Calibración del Modelo

Para calibrar y validar el modelo se utilizaron datos observados de la estación de hidrométrica de la Comisión Internacional de Límites y Aguas. Para la calibración automática de los parámetros del modelo se utilizó el programa SWAT de calibración e incertidumbre (SWAT-CUP). El procedimiento Sequential Uncertainty Fitting, versión 2 (SUFI2) se seleccionó de los cuatro disponibles en SWAT-CUP. Este proceso varía los parámetros del modelo con un rango predeterminado hasta

que la salida del modelo mejor coincide con los datos observados y necesita una cantidad menor de modelos para lograr una solución satisfactoria comparada con otras técnicas de análisis de incertidumbre (Yang et al., 2008). Wu y Chen, 2015 comparación de la SUFI2, GLUE y Parasol métodos resultó en SUFI2 es el que fue capaz de proporcionar más razonable y equilibrado resultados predictivos.

La calibración diaria se realizó durante el período del 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2005 y con un período previo de calentamiento de 5 años. La validación del modelo fue evaluada durante el período del 1 de enero de 2006 al 31 de diciembre de 2009. Los parámetros fueron seleccionados de acuerdo a trabajos previos en áreas similares que habían mostrado sensibilidad. Debido a la heterogeneidad de la cuenca, es difícil suponer que los parámetros serían los mismos a lo largo de la misma, por lo tanto, después de analizar los suelos y mapas geológicos, las subcuencas se dividieron en dos grupos (Fig. 8) para asignar Un valor de parámetro realista según cada característica de la subcuenca. Los parámetros iniciales para el modelo se definen en la Tabla 1.

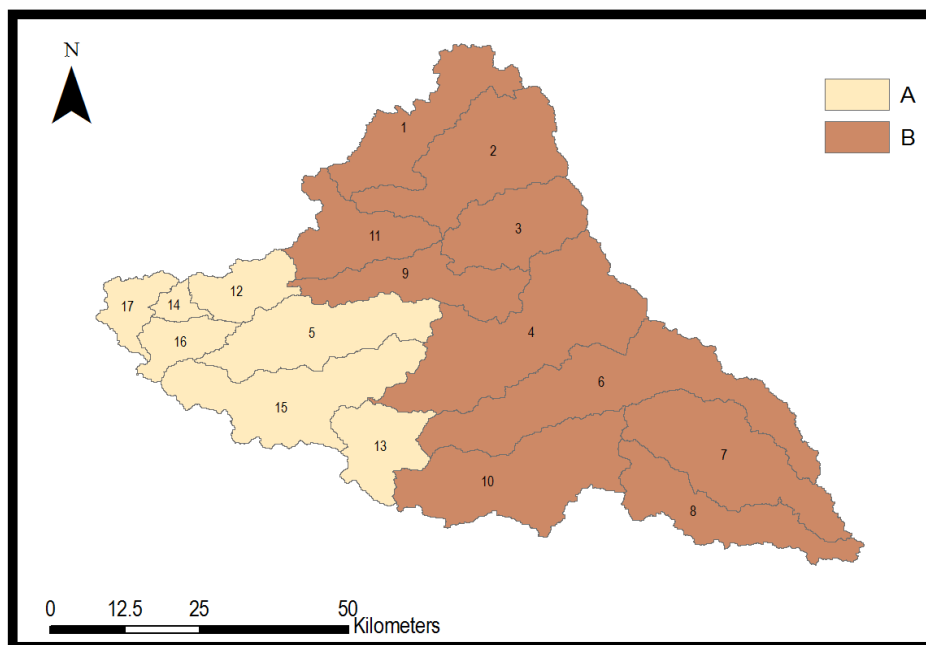


Figure 8. Sub-basin aggregation for calibration.

Parameter	Description	Value Range
-----------	-------------	-------------

		MIN	MAX
SURLAG	Surface runoff lag coefficient	0.05	24
ALPHA_BF	Baseflow recession coefficient	0	1
ALPHA_BF_D	Deep baseflow recession coefficient	0	1
ALPHA_BNK	Baseflow alpha factor for bank storage (days)	0	1
CH_K2(mm h-1)	Effective hydraulic conductivity in main channel	0	130
CN2	Runoff Curved Number	-0.3	0.3
EPCO	Plant uptake compensation factor	0	1
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0	1
GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for return flow	0	5000
GW_DELAY	Groundwater delay time	0	500
GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.02	0.2
OV_N	Manning's "n" value	-0.2	0.2
REVAPMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap"	0	500
SOL_AWC	Available water capacity	-0.8	0.8
SOL_BD	Moist bulk density	-0.2	0.2
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity	-0.8	0.8
RCHRG_DP	Deep aquifer percolation	0	1

Table 1 Initial max and minimum range for parameters calibration.

El rendimiento de la calibración se evaluó mediante técnicas de evaluación gráfica y estadística. El rendimiento se evaluó utilizando 3 funciones objetivo, Porcentaje de sesgo (PBIAS), Suma de error cuadrado (SUM) y NS. Varios estudios como Molina-Navarro (2016) y Yesuf et al (2016) han utilizado estas tres funciones para evaluar la calibración basada en la corriente que muestra resultados positivos. El sesgo porcentual (PBIAS) mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser mayores o menores que sus contrapartes observadas (Gupta et al., 1999). PBIAS se calcula como

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right]$$

La eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") comparada con la varianza ("información") de los datos medidos (Nash y Sutcliffe, 1970). NSE indica qué tan

bien el gráfico de datos observados versus simulados se ajusta a la línea 1: 1. NSE se define como

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{mean})^2} \right]$$

Donde n es el número total de observaciones, Yobs es el valor de flujo de flujo observado, Ysim es el simulado y Ymean es la media de los datos observados.

La suma del error cuadrado es la suma de los cuadrados de los residuos (desviaciones predichas de los valores empíricos reales de los datos). Es una medida de la discrepancia entre los datos y un modelo de estimación. Una pequeña SUM indica un ajuste apretado del modelo a los datos. Es dado por

$$SUM = \sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2$$

Donde n es el número total de observaciones, Yobs es el valor de flujo observado, Ysim es el simulado y Ymean es la media de los datos observados. Para cada uno, se hicieron un total de 1500 iteraciones en grupos de 500, al final Se comparó la mejor simulación para cada función y se eligió la que tenía mejor rendimiento general.

## 6.5 Análisis de la sequía

Para evaluar la variación espacio-temporal de los episodios de sequía se emplearon dos índices de sequía: el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

SPI tiene la ventaja de tener un carácter multi-escalar (Vicente-Serrano et al., 2010b) y, por lo tanto, la capacidad de ser útil para evaluar tanto los impactos a corto como largo plazo de la sequía (Moreira et al., 2012).

MO, KC et al (2010) hicieron una comparación entre el índice SPI procedente del NLDAS y el Reanálisis del Sistema de Pronóstico del Clima (CFSR), otro sistema de asimilación atmósfera-tierra-océano, que arrojó un SPI más favorable que el NLDAS. Oeste de los Estados Unidos. Por lo tanto aquí el SPI se derivó de los datos de precipitación de píxeles de NLDAS para una escala de 12 y 24 con el fin de identificar períodos de sequía a largo plazo.

Además de SPI, se analizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para evaluar los impactos espaciales de las Sequías identificadas con SPI. El índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) es el sustituto más utilizado para el verdor de la vegetación en una amplia gama de estudios que abarcan escalas regionales a globales (Anyeli y Tucker, 2005; Vrieling et al., 2013). Aunque la sequía vegetativa es difícil de identificar, puede medirse usando varios indicadores que proporcionan medios de monitoreo (Dracup et al., 1980). En este contexto, el Índice de Vegetación Diferenciada Normalizada (NDVI) (Tucker, 1979) se utiliza con frecuencia (Tucker y Choudhury, 1987; Ji y Peters, 2003; Song et al., 2004; Rulinda et al 2012).

Con los productos de imágenes de detección remota de 16 días del satélite MODIS MOD13Q1, se calculó el NDVI para la región utilizando medios históricos y mensuales. NDVI se calcula como:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Donde NIR y RED indican reflectancia espectral en las porciones del infrarrojo cercano (800e1000 nm) y roja (620e750 nm) del espectro electromagnético. El índice oscila entre -1 (cuerpos de agua) y 1 (vegetación densa). El análisis espacial ayudó a identificar los períodos de sequía más severos para el período de 2001 a 2016, ya que los datos sólo están disponibles para este período de tiempo. La vegetación escasa, como arbustos y praderas, o los cultivos de senescencia pueden

resultar en valores moderados de NDVI (aproximadamente 0.2 a 0.5). Las áreas de roca estéril, arena o nieve suelen mostrar valores muy bajos de NDVI (por ejemplo, 0.1 o menos). Los valores altos de NDVI (aproximadamente 0.6 a 0.9) corresponden a una vegetación densa como la que se encuentra en los bosques templados y tropicales o en los cultivos en su etapa de crecimiento máximo.

## **7. Resultados**

### **7.1 Evaluación del modelo**

Los valores de los parámetros obtenidos después de la calibración reflejaron las características del CRT. El coeficiente de recesión del flujo base (ALPHA\_BF) es un índice directo de la respuesta del flujo de agua subterránea a los cambios en la recarga. ALFHA BF valores varían de 0.1 a 0.3 para la tierra con una respuesta lenta a la recarga, y de 0.9-1.0 para las tierras con una respuesta rápida (Arnold et al., 2011). ALPHA\_BF tomó valores diferentes entre los 2 grupos de cuencas definidas en la sección 2.5. Se incrementó después de la calibración hasta 0.82 para el grupo B de subcuencas. Los valores de otros estudios son variables, pero generalmente son más altos cuando no hay acuíferos relevantes presentes, como es el caso de (Galván et al 2009, De Girolamo y Lo Porto, 2012). Como se espera el grupo A que es más permeable tomó un valor más bajo de 0.58.

El número curvo fue el parámetro más sensible para ambos grupos de subcuencas, esto se espera como escorrentía se estimó utilizando el método SCS. CH\_K2 es la conductividad hidráulica efectiva en el aluvión del canal principal, los valores de los parámetros calibrados fueron 13.2 mm / h para el grupo A de la subcuenca y 83,82 mm / h para el grupo B. Las características físicas del subcuenca. A, Los tipos crearon un área permeable más probable y por lo tanto este valor CH\_K2 más alto lo reflejó, ya que los valores que van de 51 a 127 representan una alta tasa de pérdida en la corriente debido a la infiltración. Por el contrario, las subcuencas del grupo A con pendientes más altas y características impermeables presentan una tasa de pérdidas moderada.

El parámetro de almacenamiento del Banco contribuye con el flujo hacia el canal principal o el alcance dentro de las subcuencas. El flujo bancario se simula con una curva de recesión similar a la utilizada para las aguas subterráneas. El factor alfa del flujo base, o constante de recesión, caracteriza la curva de recesión del almacenamiento bancario. Esta constante será un número menor que 1,0, y será mayor (enfoque uno) para las recesiones planas y pequeñas (enfoque cero) para las recesiones pronunciadas.

El modelo reprodujo satisfactoriamente la descarga observada y su tendencia de cambio en el tiempo. En general, el conjunto de iteraciones PBIAS mostró los mejores resultados y por lo tanto la mejor simulación de este conjunto se utilizó para la validación. Los resultados de la mejor calibración diaria de la simulación (Fig. 9) fueron los siguientes: Coeficiente de Nash-Sutcliffe 0.38 y PBIAS -13.2. Los resultados de las estadísticas mensuales fueron mucho mejores: Coeficiente Nash-Sutcliffe 0.72 y PBIAS -9.47. Según Moriasi et al. (2007), un valor NSE entre 0,65 y 0,75 se considera bueno y los valores PBIAS entre -10 y 0 son muy buenos, el rendimiento de la calibración del modelo puede calificarse como muy bueno para PBIAS resultando en una simulación precisa del hidrograma especialmente durante condiciones normales de flujo. Además, la agrupación de las subcuencas realizada para la calibración ayuda a asegurar un procedimiento más realista que aplicar los mismos valores para todas las subcuencas. Los resultados de validación (Fig. 10) para la base diaria fueron: Coeficiente de Nash-Sutcliffe 0.56 y PBIAS -33.8. Aunque los números de validación no son tan buenos como los obtenidos con la calibración, sigue siendo satisfactorio debido a la buena simulación de períodos de flujo normal o seco que para esta investigación es el foco principal.

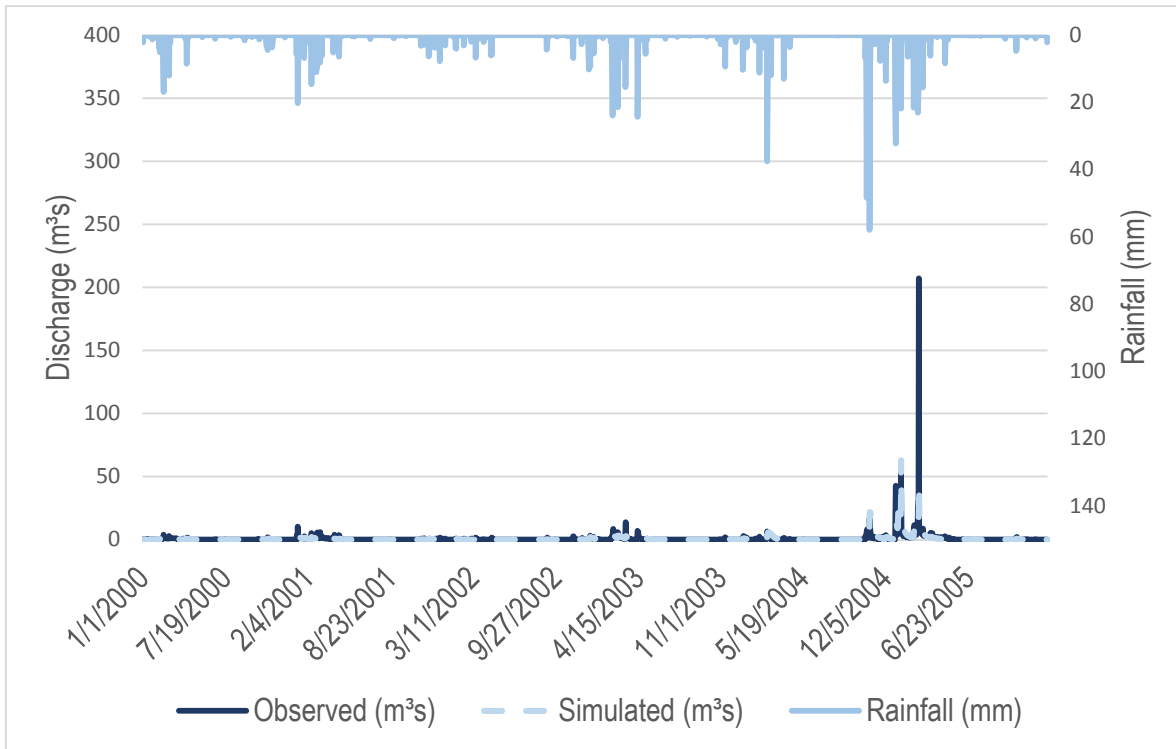


Figure 9. Daily observed and simulated discharges for calibration period

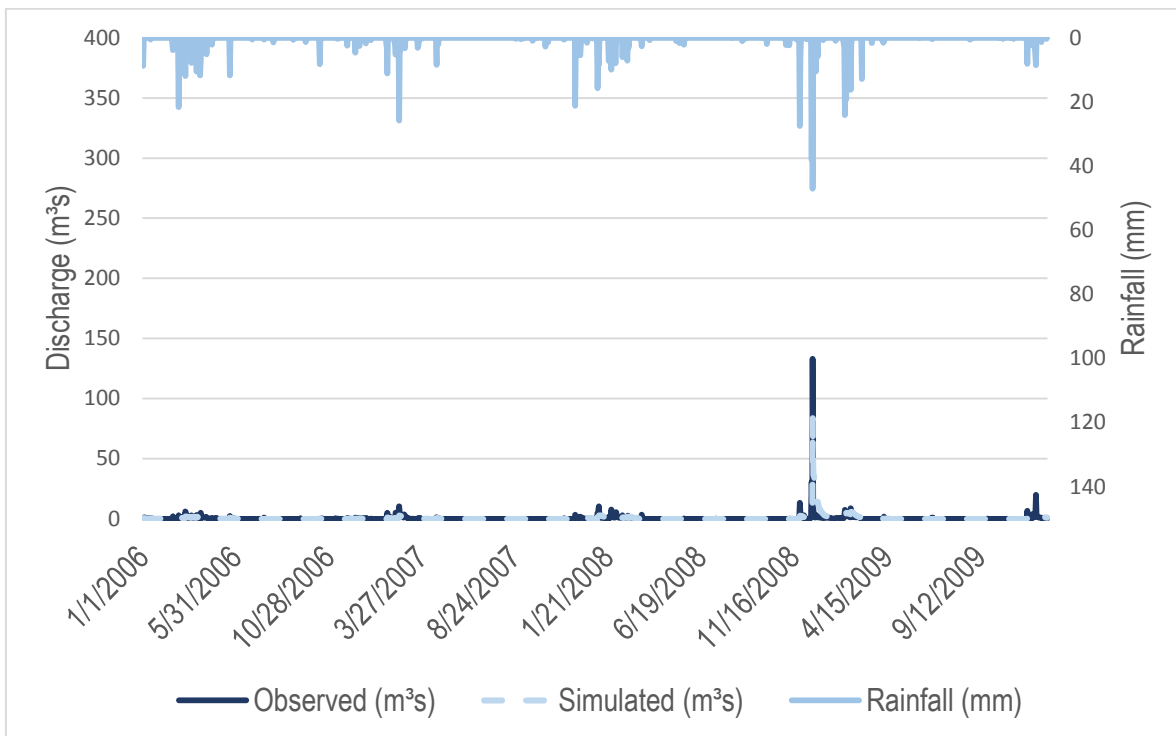


Figure 10. Daily observed and simulated discharges for validation period

## 7.2 Periodos de sequía

El análisis de SPI (Fig. 11) ayudó a identificar los períodos de sequía más prolongados y severos. Para una escala de 12 meses, uno de los períodos más severos y prolongados ocurrió durante el período de 1999 a 2003. Durante este período, de marzo de 1999 a marzo de 2003, todos los valores permanecieron por debajo de 0, indicando un período de sequía a largo plazo. Que según Mckee 1993, denota una sequía severa. De enero de 2006 a noviembre de 2008 los valores de SPI también se mantuvieron por debajo de 0 a través de todos los meses que lo que indica un período de precipitación muy bajo. Durante el año 2014 se presentaron condiciones secas que muestran valores muy bajos hasta septiembre de 2015. Finalmente, al inicio de la serie, para el período de 1984 a julio de 1990, la mayoría de los meses mostraron valores por debajo del cero con algunas excepciones que son muy cercanos a 0, por lo que consideramos importante evaluar los impactos sobre el balance hídrico durante este período, siendo éste el más largo de los periodos secos identificados.

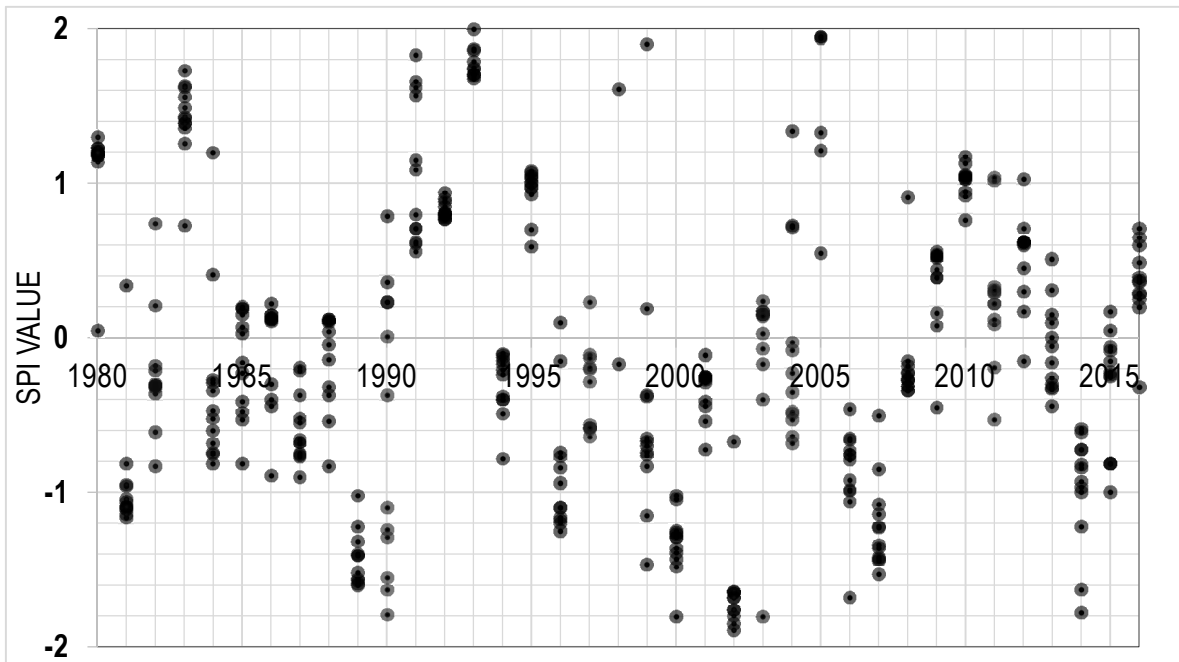


Figura 11. Variabilidad anual de SPI en escala de 12 meses

Con la escala SPI de 24 meses (Fig. 12) se identificaron casi los mismos periodos de sequía, aunque se prolongaron durante algunos meses. Los periodos identificados fueron: marzo de 1985 a febrero de 1991, febrero de 2000 a septiembre de 2004, diciembre de 2006 a enero de 2009 y noviembre de 2013 a marzo de 2016. Mirchi. (2013) El clima abordó los impactos del cambio climático en los recursos hídricos de California e identificó la sequía plurianual más reciente de 2007-2009, aunque este período de sequía es para todos los estados de California tanto SPI de escala para el sur de California identificó grandes periodos de sequía alrededor de los mismos años 2006 -2008 para 12 escalas y para 24 escalas de 2006 a enero de 2009.

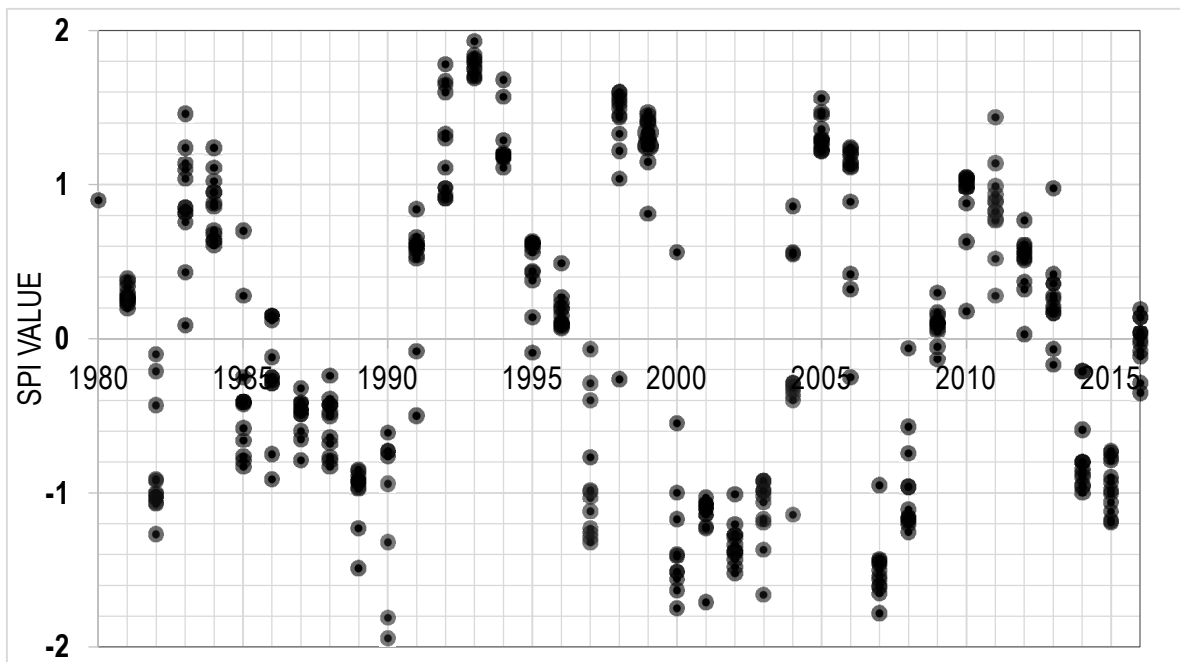


Figura 12. Variabilidad anual SPI de 24 meses

Los impactos espaciales y sobre la vegetación de los períodos de sequía pueden ser abordados usando imágenes NDVI. La Figura 13a representa la extensión espacial promedio del NDVI para el tiempo disponible de 2000 a 2016. Durante el período de sequía de 2000-2003 (Fig. 13b) los valores al norte y al sudeste de la cuenca aumentaron significativamente en comparación con el promedio histórico. 2006-2008 (Fig. 13c) resultó mucho peor, los valores bajos de NDVI aumentaron significativamente en toda la cuenca. Finalmente, el período de sequía 2014-2015 (Fig. 13d) se comportó muy similar al período 2000-2003, aunque con un ligero aumento en valores más altos de NDVI para la porción central se puede observar.

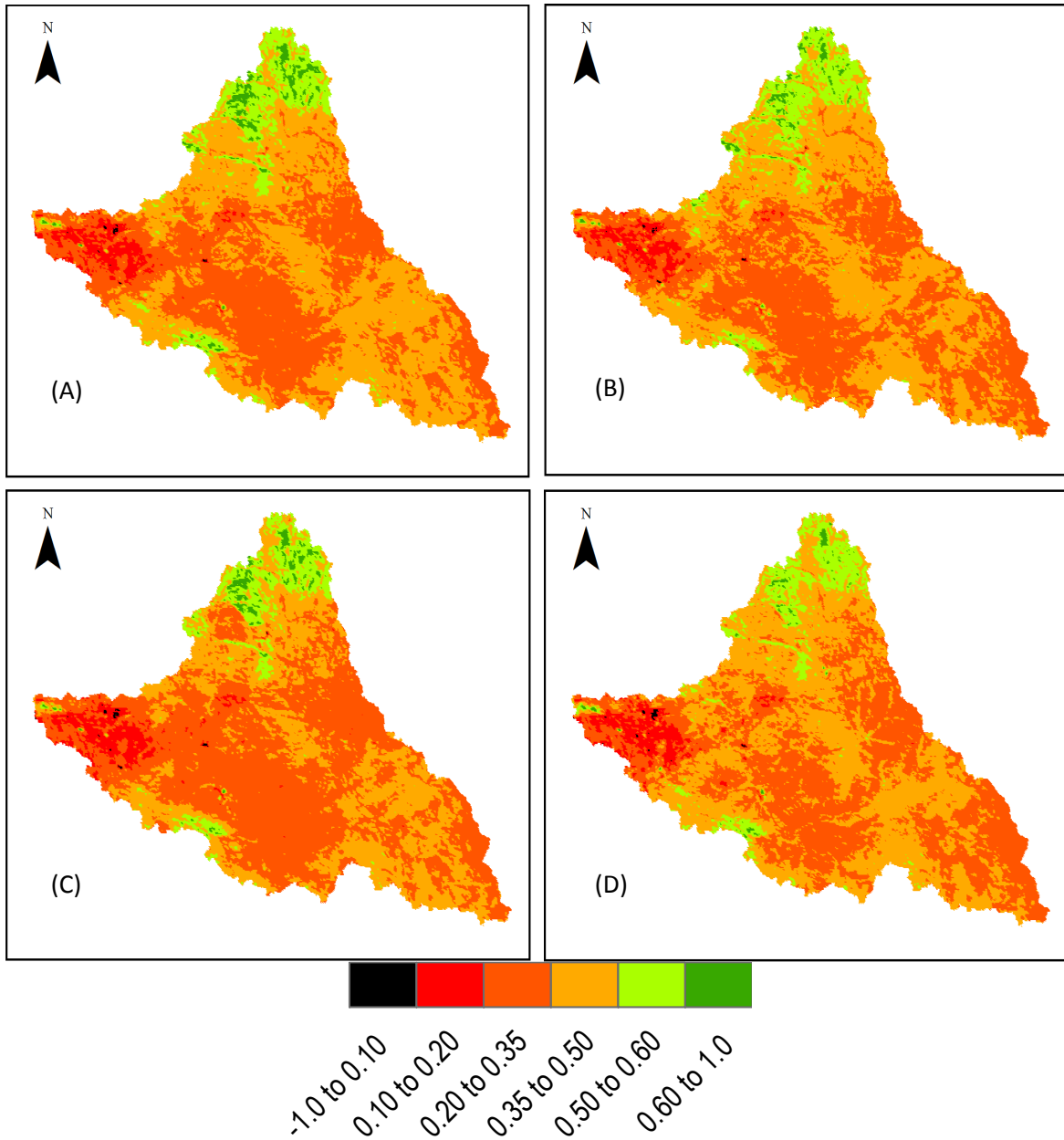


Figure 13. (a) Historical NDVI average map, (b) 2000-2003 Drought period NDVI map, (c) 2006-2008 Drought period NDVI map, (d) 2014-2015 Drought period NDVI map

### 7.3 Impactos hidrológicos

Una vez que el modelo fue calibrado y validado, los impactos de sequía fueron evaluados analizando el balance hídrico generado después de una simulación de la serie completa. La Tabla 2 muestra los resultados para cada período simulado, el primero (1984-2016) que representa la serie de tiempo completo. La simulación

mostró los resultados esperados ya que la mayor parte de la precipitación se pierde durante los períodos de sequía por evapotranspiración, solo alrededor del 3% de la precipitación se infiltra en el acuífero.

En la Tabla 2 aparecen las variables seleccionadas para evaluar los impactos en el balance hídrico, la precipitación proveniente de la base de datos de NLDAS, el escurrimiento total en SWAT representa la suma de todas las variables simuladas que aportan agua al caudal ya sea flujo superficial o aportes del escurrimiento lateral en el suelo, si bien esta cuenca no se caracteriza por sus acuíferos es importante tomar en cuenta el comportamiento de esta variable y ver el impacto que sufren, por último la evapotranspiración juega un rol muy importante siendo esta una zona semiárida y es la principal pérdida de agua en el balance de la cuenca.

Haciendo énfasis en todos los resultados de los índices sequía y las simulaciones de cada periodo seco podemos identificar claramente como uno de los más graves al que transcurre durante 1999-2003. Durante este periodo se presentó una reducción de aproximadamente 40% por debajo de la media histórica. Esta reducción aumenta exponencialmente en términos del escurrimiento total el cual disminuye en un 67%. A pesar de esto en este periodo no se presentó la menor recarga del acuífero viéndose reducido en poco más del 40% esto muy probablemente a la poca evapotranspiración en este periodo.

El periodo con menor reducción de precipitación fue el periodo 2006-2008 en el cual se redujo la precipitación en 13% aun así se redujo considerablemente el escurrimiento 45% por debajo de la media y la recarga total se redujo 58%.

La sequía del 2014 si bien fue corta impacto bastante los valores de la cuenca, de haberse prolongado más se pudiera considerar como la más severa del periodo analizado, aproximadamente se redujo 20% la precipitación pero la variable más impactada fue la recarga total la cual se redujo casi en su totalidad debido a las altas tasas de evapotranspiración.

Periodo	Precipitación (mm)	Escorrentamiento total (mm)	Recarga Total del Acuífero (mm)	ET (mm)
1984-2016	229	9	7	212
1984-1990	165	3	2	166.
1999-2003	136	2	4.	131
2006-2008	201	5	3	161
2014-2015	192	3	0.05	178

Table 2. Drought periods simulation results

## 8. Conclusiones

Hay evidencia de que en el siglo XX varios periodos de sequía han impactado el suroeste de los Estados Unidos y el noroeste de México y que exacerbará la frecuencia y magnitud de las sequías hidrológicas debido principalmente al cambio climático. Los resultados de este estudio informan que en el período 1980-2016 la Cuenca del Río Tijuana fue golpeada por cuatro grandes sequías, especialmente en los períodos de 1984/89, 1999/2003, 2006/08 y 2014/15.

La sequía de 1999/2003 fue la más grave de la región, la disponibilidad hídrica se vio reducida considerablemente debido a las bajas precipitaciones, además fue la más prolongada de los últimos años. Espacialmente podemos ver los impactos fácilmente en las partes altas de la cuenca donde los niveles de NDVI disminuyeron indicando vegetación en decadencia y afectada por esta sequía

Dado el impacto potencial de la sequía en California y Baja California, este estudio evaluó los impactos de la sequía en la hidrología de la cuenca. Es importante que ambos países establezcan estrategias de gestión de los recursos hídricos conjuntamente para abordar los impactos actuales y futuros en el escaso abastecimiento de agua para las cuencas transfronterizas.

El uso de un modelo hidrológico SWAT demostró ser una valiosa herramienta para la evaluación y monitoreo de la sequía. El sistema NLDAS como insumo climático ayudó a asegurar un mejor desempeño del modelo, lo que se ha demostrado antes en otras áreas de estudio donde se realizó una comparación entre un modelo establecido con datos de estaciones meteorológicas y NLDAS, mostrando un mejor comportamiento con NLDAS. El uso de estos datos climáticos para otro estudio es una opción muy viable especialmente en áreas sin suficientes estaciones o la falta de datos de calidad.

El monitoreo de la sequía de SPI ha sido uno de los principales índices para el monitoreo de la sequía, combinado con la gran cantidad de datos de NLDAS que ayudó a identificar los principales períodos de sequía. Las imágenes de NDVI de MODIS ayudaron a analizar la extensión espacial de la sequía durante los períodos identificados que nos muestran áreas donde la calidad de la vegetación se había reducido.

El modelo SWAT es el primero realizado para esta área de estudio, utilizando productos de teledetección como datos de entrada, el modelo logró recrear las características de la cuenca. Un buen rendimiento durante la calibración abre la puerta para el futuro uso de esta herramienta de modelado durante diferentes escenarios, realizar una calibración multisitio será el siguiente paso lógico para este modelo cuando se disponga de más datos observados. El análisis del balance hídrico mostró cuánto puede afectar exponencialmente la sequía a variables tales como escorrentía o recarga. En general, la metodología debe ser una guía para las áreas con características similares para evaluar los impactos de la sequía o la gestión del agua.

## **9. Referencias**

Amin Zargar, Rehan Sadiq, Bahman Naser, and Faisal I. Khan. (2011) A review of Drought Indices. Environmental Review September 2011, 333-349.

Ahn, S., Jae, H., & Seong, J. (2016). Assessing drought threats to agricultural water supplies under climate change by combining the SWAT and MODSIM models for the Geum River basin, South Korea. *Hydrological Sciences Journal* 61. 15, 2740-2753.

Alfieri, L., Burek, P., Dutra, E., Krzeminski, B., Muraro, D., Thielen, J., & Pappenberger, F. (2013). GloFAS-global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. *Hydrol. Earth Syst. Sci* 17, 1161-1175.

Anyamba, A., Tucker, C.J., 2005. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981e2003. *J. Arid. Environ.* 63, 596e614.

Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., Haney, E.B., Neitsch, S.L., 2011. Soil and water assessment tool input/output file documentation version 2009. In: Texas Water Resource Institute Technical Report No. 365. Texas A&M University System, College Station, Texas.

Bárdossy, A., & Pegram, G. (2014). Infilling missing precipitation records. A comparison of a new copula-based method with other techniques. *Journal of hydrology*, 519, 1162-1170.

Beighley, R., Eggert, K., Dunne, T., He, Y., Gummadi, V., & Verdin, K. (2009). Simulating hydrologic and hydraulic processes throughout the Amazon River Basin. *Hydrol. Process.* 23 (8), 1221-1235.

Brown, S., Versace, V., Lester, R., & Walter, M. (2015). Assessing the impact of drought and forestry on streamflow in south-eastern Australia using a physically based hydrological model. *Environmental earth sciences* 74(7), 6047-6063.

BJERKNES, J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, v. 97, p. 163-172, 1969.

Bonsal, Barrie R., et al. "Drought research in Canada: a review." *Atmosphere-Ocean* 49.4 (2011): 303-319

Casado Sáenz, M., Flores Montoya, F., Gil de Mingo, R. 2009. The role of groundwater during drought. In: Iglesias, A., Garrote, L., Cancelliere, A., Cubillo, F., Wilhite, D. (eds.). *Coping with drought risk in agriculture and water supply systems*. p. 221-241. (Advances in Natural and Technological Hazards Research Vol. 26). Springer. ISBN: 978-1-4020-9044-8.

Comer, K., Silvan, L., Saxod, E., & Zúñiga, W. (2006) "Mas allá de la Generación de Información para la Gestión de Cuencas Hídricas: La experiencia

del Consejo Consultivo de la Cuenca Hídrica Binacional del Río Tijuana” José Luis Castro-Ruiz, Paul Ganster, Richard Wright.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2012). Análisis espacial de las regiones más vulnerables ante las sequías en México. SEMARNAT. México, DF, 43.

CONAGUA. (2012). Programa Hídrico Regional Visión 2030, Región Hidrológico-Administrativa I Península de Baja California.

Corona, J., Lakhankar, T., Pradhanang, S., & Khanbilvardi, R. (2014). Remote Sensing and Ground-Based Weather Forcing Data Analysis for Streamflow Simulation. *Hydrology*, 1(1), 89-111.

Correa, S., de Paiva, R., Espinoza, J., & Collischonn, W. (2017). Multi-decadal Hydrological Retrospective: Case study of Amazon floods and droughts. *Journal of Hydrology*, 667-684.

Cooley, H., 2006. Floods and droughts. In: Gleick, P., Wolff, G., Cooley, H., Palaniappan, M., Samulon, A., Lee, E., Morrison, J., Katz, D. (Eds.), *The World's Water 2006–2007: The Biennial Report on Freshwater Resources*. Island Press, p. 392

Cordery I. & McCall, M. (2000) A model for forecasting drought from teleconnections. *Water Resour. Res.* 36, 763-768.

. Cruz, G., Baethgen, W., Picasso, V., & Terra, R. (2014). Análisis de sequías agronómicas en dos regiones ganaderas de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 18(1), 126-132.

Dai, A., 2011. Drought under global warming: a review. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change* 2, 45–65

De Girolamo, A., Lo Porto, A., 2012. Land use scenario development as a tool for watershed management within the Rio Mannu Basin. *Land Use Policy* 29, 691–701.

De la Parra-Rentería, C. (2017). Diagnóstico socioambiental para el Programa del Manejo Integral del Agua de la Cuenca del Río Tijuana. Colegio de la Frontera Norte.

Dracup, J.A., Lee, K.S. and Paulson, E.G. Jr., (1980). On the Definition of Droughts. *Water Resources Research*, 16 (2): 297–302.

Downing, T.E., Baker, K., 2000. Drought discourse and vulnerability. In: Wilhite, D.A. (Ed.), *Drought: A Global Assessment*. Routledge, London, UK, pp. 213–230.

Ficklin, D., Luo, Y., & Zhang, M. (2013 ). Watershed modelling of hydrology and water quality in the Sacramento River watershed, California. *Hydrol. Process* 27, 236-250.

Freire-González, J., Decker, C., & Hall, J. (2017). The economic impacts of droughts: A framework for analysis. *Ecological Economica* 132, 196-204.

Gaál, L. K. (2007). Region of Influence approach of a frequency analysis of heavy precipitation in Slovakia. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 6, 2361-2401.

Galván, L., Olías, M., Fernandez de Villarán, R., Domingo Santos, J.M., Nieto, J.M., Sarmiento, A.M., Cánovas, C.R., 2009. Application of the SWAT model to an AMD-affected river (Meca River, SW Spain): estimation of transported pollutant load. *J. Hydrol.* 377, 445–454.

Griffin, D., & Anchukaitis, K. (2014). How unusual is the 2012-2014 California drought? *Geophys. Res. Lett.* 41, 9017-9023.

Goddard, S., Harms, S.K., Reichenbach, S.E., Tadesse, T., Waltman, W.J., 2003. Geospatial decision support for drought risk management. *Commun. ACM* 46, 35–37.

Güneralp, B., Güneralp, I , Liu, Y., 2015. Changing global patterns of urban exposure to flood and drought hazards. *Glob. Environ. Change* 31, 217–225

Gupta, H., Sorooshian, S., & Yapo, P. (1999). Status of automatic calibration fro hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. . *Journal of Hydrologic Engineering* 4 (2), 135-143.

Huang, S., Huang, Q., Chang, J., & Leng, G. (2016). Linkages between hydrological drought, climate indices and human activities: a case study in the Columbia River basin. *International Journal of Climatology*, 36(1), 280-290.

Henderson, J., & Kauffman, N. (2012). Initial impacts of the 2012 drought. *Main Street Economist*, (3).

Hisdal, H., Tallaksen, L., Clausen, B., Peters, E., & Gustard, A. (2004). Hydrological Drought Characteristics. *Developments in Water Science*, 139-198.

Howitt, R., Macewan, D., & Medellin-Azuara, J. (2015). Economic Analysis of the 2015 Drought for California Agriculture, Center for Watershed Sciences, University of California, Davis, California.

Howitt, R., MacEwan, D., Medellín-Azuara, J., Lund, J., & Sumner, D. (2015). Economic Analysis of the 2015 Drought for California Agriculture. Center for Watershed Sciences, University of California.

Iglesias, A., Moneo, M., Quiroga, S. 2009b. Methods for evaluating social vulnerability to drought. In: Iglesias, A., Garrote, L., Cancelliere, A., Cubillo, F., Wilhite, D. (eds.). Coping with drought risk in agriculture and water supply systems. p. 153-159. (Advances in Natural and Technological Hazards Research Vol. 26). Springer. ISBN: 978-1-4020-9044-8.

IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland.: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE.

Jarvis, A., Reuter, H., Nelson, A., & Guevara, E. (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>).

Ji, L., Peters, A., 2003. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment* 87, 85e98.

Jha, M., Gassman, P., Secchi, S., Gu, R., & Arnold, J. (2004). Effect of watershed subdivision on SWAT flow, sediment and nutrient prediction. *J. Am. Water Resour. Assoc* 40, 811-825.

Kamali, B., Houshmand Kouchi, D., Yang, H., & Abbaspour, K. (2017). Multilevel Drought Hazard Assessment under Climate Change Scenarios in Semi-Arid Regions—A Case Study of the Karkheh River Basin in Iran. *Water*, 9(4), 241.

Karlsson, I., Sonnenborg, T., Refsgaard, J., Trolle, D., Borgesen, C., Olesen, J., . . . Jensen, K. (2016). Combined effects of climate models, hydrological model structures and land use scenarios on hydrological impacts of climate change. *J. Hydrol* 535, 301-317.

Keyantash, J., & Dracup, J. (2002). The quantification of drought: an evaluation of the drought indices. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 83, 1167-1180.

Kim, H., Park, J., Yoo, J., & Kim, T. W. (2013). Assessment of drought hazard, vulnerability, and risk: A case study for administrative districts in South Korea. *Journal of Hydro-environment Research*.

Kim, D. W., Byun, H. R., Choi, K. S., & Oh, S. B. (2011). A spatiotemporal analysis of historical droughts in Korea. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(9), 1895-1912.

Kim, J., & Ryu, J. (2015). Quantifying a threshold of missing values for gap fitting processes in daily precipitation series. *Water resources management*, 29(11), 4173-4184.

Klisch, A., & Atzberger, C. (2016). Operational Drought Monitoring in Kenya Using MODIS NDVI Time Series. *Remote Sensing*, 8(4), 267.

Leon, L., Sharma, V., & George, C. (2006). The WaterBase Project. Obtenido de [www.waterbase.org](http://www.waterbase.org)

Lei, Yongdeng, et al. "How rural land use management facilitates drought risk adaptation in a changing climate—A case study in arid northern China." *Science of The Total Environment* 550 (2016): 192-199.

Lettenmaler, D., Alsdorf, D., Dozier, J., Huffman, G., Pan, M., & Wood, E. (2015). Inroads of remote sensing into hydrologic science during the WRR era. *Water Resour. Res.* 51 (9), 7309-7342.

Luo, L., & Coauthors, a. (2003). Validation of the North American Land Data Assimilation System (NLDAS) retrospective forcing over the southern Great Plains. *J. Geophys Res.*, 108.

Márdero, S., Nickl, E., Schmook, B., Schneider, L., Rogan, J., Christman, Z., & Lawrence, D. (2012). Sequías en el sur de la península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Investigaciones geográficas*, (78), 19-33.

Mercado Mancera, G., E. Troyo Diéguez, A. Aguirre Gómez, B. Murillo Amador, L. F. Beltrán Morales y J. L. García Hernández (2010), "Calibración y aplicación del Índice de Aridez de De Martonne para el análisis del déficit hídrico como estimador de la aridez y desertificación en zonas áridas", *Universidad y Ciencia*, vol. 26, núm. 1, pp. 51-64

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183). Boston, MA, USA: American Meteorological Society.

- Milan Gocic, S. T. (2014). Spatiotemporal characteristics of drought in Serbia *Journal of Hidrology* 510, 110-123.
- Mitchell, K. E., & Coauthors, a. (2004). The multi-institution North American Land Data Assimilation System (NLDAS): Utilizing multiple GCIP products and partners in a continental distributed hydrological modeling system. *J. Geophys. Res.* 109, D07S90, doi:10.1029/2003JD003823.
- Mirchi, A., Madani, K., Roos, M., & Watkins, D. W. (2013). Climate change impacts on California's water resources. In *Drought in arid and semi-arid regions* (pp. 301-319). Springer Netherlands.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1), 202-216.
- Mildrexler, D., Yang, Z., Cohen, W. B., & Bell, D. M. (2016). A forest vulnerability index based on drought and high temperatures. *Remote Sensing of Environment*, 173, 314-325.

Mohammad Amin Asadi Zarch, B. S. (2014). Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). *Journal of Hidrology* 526, 183-195.

Mo, K. C., Long, L. N., Xia, Y., Yang, S. K., Schemm, J. E., & Ek, M. (2011). Drought indices based on the Climate Forecast System Reanalysis and ensemble NLDAS. *Journal of Hydrometeorology*, 12(2), 181-205.

Molina-Navarro, E., Hallack-Alegría, M., Martínez-Pérez, S., Ramírez-Hernández, J., Mungaray-Moctezuma, A., & Sastre-Merlín, A. (2016). Hydrological modeling and climate change impacts in an agricultural semiarid region. Case study: Guadalupe River basin, Mexico. *Agricultural Water Management* 175, 29-42.

Molina-Navarro, E., Andersen, H.E., Nielsen, A., Thodsen, H., Trolle, D., 2017. The impact of the objective function in multi-site and multi-variable calibration of the SWAT model. *Environmental Modelling & Software* 93, 255-267.

Moreira, E.E., Mexia, J.T., Pereira, L.S., 2012. Are drought occurrence and severity aggravating? A study on SPI drought class transitions using log-linear models and ANOVA-like inference. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 3011–3028

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Liew, M.W., Bingner, Van, Harmel, R.L., Veith, R.D., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50, 885–900

Morales, A.; J. Olcina y A. Rico, 2000. Diferentes percepciones de las sequías en España: adaptación, catastrofismo e intentos de corrección. *Investigaciones Geográficas* nº 23. Instituto Universitario de Geografía. Universidad de Alicante.

Murthy, C. S., Laxman, B., & Sai, M. S. (2015). Geospatial analysis of agricultural drought vulnerability using a composite index based on exposure, sensitivity and adaptive capacity. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 12, 163-171.

Nash, J., & Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models 1: a discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282-290.

Neal, J., Schumann, G., & Bates, P. (2012). A subgrid channel model for simulating river hydraulics and floodplain inundation over large and data sparse areas. *Water Resour. Res.* 48.

Nijssen, B., O'donnell, G., Hamlet, A., & Lettenmajer, D. (2001). Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change. *Clim. Change* 50 (1), 143-175.

Nogués-Peagle, J., Mechoso, C., Fu, R., Berbery, H., Winston, C., Chao, T., . . . Zhou, J. (2002). Progress in Pan American CLIVAR research, understanding the South American Monsoon. *Meteorologica* 27, 3-30.

Ojeda-Revah, L., & Espejel-Carbajal, M. I. (2008). La cuenca binacional del río Tijuana: un enfoque biohistórico. *Economía, sociedad y territorio*, 8(26), 517-548.

Ortega-Gaucin, D. (2013). Caracterización de las sequías hidrológicas en la cuenca del río Bravo, México. *Terra Latinoamericana*, vol.31, no. 3, 167-180.

Osorio, J. G., & Galiano, S. G. (2012). Non-stationary analysis of dry spells in monsoon season of Senegal River Basin using data from Regional Climate Models (RCMs). *Journal of hydrology*, 450, 82-92.

Palmer, W. C. (1965). *Meteorological drought* (Vol. 30). Washington, DC, USA: US Department of Commerce, Weather Bureau.

Pinker, R. T., & Coauthors, a. (2003). Surface radiation budgets in support of the GEWEX Continental-Scale International Project (GCIP) and the GEWEX Americas Prediction Project (GAPP), including the North American Land Data Assimilation System (NLDAS) project. . *J. Geophys. Res.*, 108.

Quiring, S.M. 2009. Monitoring drought: An evaluation of meteorological drought indices. *Geography Compass*, 3(1): 64– 88. doi:10.1111/j.1749-8198.2008.00207.x.

Ravelo, A.C., 2012. Informes Finales del Proyecto PREMIA. OMM - CONAGUA. <https://sites.google.com/a/wmo.int/mex/system/app/pages/search?scope=searchsite&q=ravelo> Consultada el 22/08/2013.

Reyes, C. M. V., Martínez, R. O. V., Crespo, C. L., & Aguilar, G. E. (2015). Análisis de la sequía en la subcuenca del río Bonito mediante el índice de precipitación estandarizado. *Revista Ciencia y Tecnología*, (14), 25-41.

Richman, M., & Leslie, L. (2015). Uniqueness and Causes of the California Drought. *Procedia Computer Science* 6, 426-435.

Rivera, J. A. (2014). *Aspectos climatológicos de las sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. Análisis regional y proyecciones futuras* (Doctoral dissertation, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires).

Robles-Morua, A., Vivoni, E. R., & Mayer, A. S. (2012). Distributed hydrologic modeling in northwest Mexico reveals the links between runoff mechanisms and evapotranspiration. *Journal of Hydrometeorology*, 13(3), 785-807.

Robeson, S. (2015). Revisiting the recent California drought as an extreme value. *Geophys. Res. Lett.* 42 (16), 6771-6779.

Rulinda, C. M., Dilo, A., Bijker, W., & Stein, A. (2012). Characterising and quantifying vegetative drought in East Africa using fuzzy modelling and NDVI data. *Journal of Arid Environments*, 78, 169-178.

SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2017, 06 20). Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON). Retrieved from <https://www.gob.mx/sagarpa>

Sanchez, A. (2006). 1944 Water treaty Between Mexico and the United States: Present situation and future potential . *Frontera Norte* 18 (36), 125-144.

Seager, R., Ting, M., Held, I., Kushnir, Y., Lu, J., Vecchi, G., Huang, H.P., Harnik, N., Leetmaa, A., Lau, N.C., Li, C., Velez, J., Naik, N., 2007. Model projections of an imminent transition to a more arid climate in Southwestern North America. *Science* 316, 1181–1184.

Sheffield, J., & Wood, E. (2008). Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Clim Dyn* 31, 79-105.

Skinner, C., Rellerby, T., Greatrex, H., & Grimes, D. (2015). Hydrological modelling using ensemble satellite rainfall estimates in a sparsely gauged river basin. The need for whole-ensemble calibration. *Journal of Hydrology*, 110-122.

Smith, A., & Katz, R. (2013). US billion-dollar weather and climate disasters: data sources, trends, accuracy and biases. *Nat. Hazards*, 387-410.

Song, X., Saito, G., Kodama, M., Sawada, H., 2004. Early detection system of drought in East Asia using NDVI from NOAA/AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 25 (16), 3105-3111.

Steiner, M., Smith, J., Burges, S., Alonso, C., & Darden, R. (1999). Effects of bias adjustment and rain gauge data quality control on radar rainfall. *Water Resour. Res.*, 35, 2487-2503.

Tovar, C. M. (2012). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasylva: revista internacional de silvicultura e industrias forestales*, (238), 39-46.

Tucker, C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8, 127-150.

Tucker, C.J., Choudhury, B.J., 1987. Satellite remote sensing of drought conditions. *Remote Sensing of Environment* 23, 243-251

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J. J., López-Moreno, J. I., Azorin-Molina, C., ... & Sanchez-Lorenzo, A. (2012). Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions*, 16(10), 1-27.

von Gunten, D., Wohling, T., Haslauer, C., Merchán, D., Causapé, J., & Círpka, O. (2016). Using an integrated hydrological model to estimate the usefulness of meteorological drought indices in a changing climate. *Hydrology and Earth System Sciences* 20(10).

Vogt, J.V. & Somma, F. (Eds.) (2000) *Drought and Drought Mitigation in Europe*. Kluwer, Dordrecht.

WANG, C.; DESER, C.; YU, J.-Y.; DINEZIO, P.; CLEMENT, A. El Niño-Southern Oscillation (ENSO): A review. In "Coral Reefs of the Eastern Pacific", P. Glynn, D. Manzello, and I. Enochs, Eds., Springer Science Publisher., 2012

White, D.H., Walcott, J.J. 2009. The role of seasonal indices in monitoring and assessing agricultural and other droughts: a review. *Crop & Pasture Science* 60: 599-616.

- Wilhite DA, G. M. (1985). Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. . *Water International* 10, 111-120.
- Wu, H., & Chen, B. (2015). Evaluating uncertainty estimates in distributed hydrological modeling for the Wenjing River watershed in China by GLUE, SUFI-2, and ParaSol methods. *Ecol. Eng* 76, 110-121.
- Yamazaki, D., Lee, H., Alsdorf, D., Dutra, E., Kim, H., Kanae, S., & Oki, T. (2012). Analysis of the water level dynamics simulated by global river model. A case study in the Amazon River. *Water Resour. Res.* 48.
- Yang, J., Retchet, P., Abbaspour, K., Xia, J., & Yang, H. (2008). Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *J. Hydrol* 258, 1-23.
- Yengoh, G. T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A. E., & Tucker III, C. J. (2015). Recommendations for Future Application of NDVI. In *Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales* (pp. 57-59). Springer International Publishing.
- YEH, S.W.; KUG, J.S.; DEWITTE, B.; KWON, M.H.; KIRTMAN, B. P.; JIN, F.F. El Niño in a changing climate, *Nature*, v. 461, p. 511–515, 2009
- Xenarios, S., Nemes, A., Sarker, G. W., & Sekhar, N. U. (2016). Assessing vulnerability to climate change: Are communities in flood-prone areas in Bangladesh more vulnerable than those in drought-prone areas?. *Water Resources and Rural Development*, 7, 1-19.
- Zadeh, F., Nossent, J., Sarrazin, F., Pianosi, F., van Griensven, A., Wagener, T., & Bauwens, W. (2017). Comparison of variance-based and moment-independent global sensitivity analysis approaches by application to the SWAT model. *Environmental Modelling & Software*, 91, 210-222.