

Causas de eventos de inundación en la ciudad de San José de Mayo, Uruguay

Causes of flooding events in the city of San José de Mayo, Uruguay

Feline Schön¹ , Bernardo Zabaleta²  y Marcel Achkar³ 

RESUMEN

El cambio en el régimen de eventos de inundaciones en espacios urbanos es una problemática global. Para identificar posibles causas de las inundaciones en San José de Mayo, se analiza a nivel de cuenca los factores que favorecen este fenómeno, considerando el cambio climático y las transformaciones en los usos del suelo. Se evalúa la incidencia de la variabilidad de eventos fuertes de precipitación, precipitaciones acumuladas e intensificación productiva en relación al caudal del río, con el fin de comprender la ocurrencia de eventos de inundación en la ciudad. Se identificaron en los últimos 30 años aumentos en las precipitaciones; una asociación entre las precipitaciones y los niveles del río; y además un cambio en la matriz productiva en el territorio. Donde los procesos de impermeabilización del suelo, frente al cambio climático, generan una situación de mayor vulnerabilidad para la población en áreas inundables. Se muestra la importancia de crear una estrategia territorial a nivel nacional para actuar en los espacios urbanos inundables, teniendo en cuenta toda la cuenca.

Palabras clave: cambio climático, cambio uso de suelo, precipitaciones, transformaciones territoriales.

ABSTRACT

The change in the regime of flood events in urban spaces is a global problem. In order to identify possible causes of flooding in San José de Mayo, the factors that favour this phenomenon are analysed at basin level, taking into account climate change and changes in land use. The incidence of the variability of strong rainfall events, accumulated rainfall and productive intensification in relation to the river flow is evaluated in order to understand the occurrence of flooding events in the city. Increases in precipitation were identified in the last 30 years; an association between precipitation and river levels; and also a change in the productive matrix in the territory. Where the processes of soil waterproofing, in the face of climate change, generate a situation of greater vulnerability for the population in flood-prone areas. The importance of creating a territorial strategy at the national level to act in urban flood areas, taking into account the whole basin, is shown.

Keywords: climate change, land use changes, precipitation, territorial transformations.

¹ Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias, Universidad de la República. Correo electrónico: fschon@fcien.edu.uy

² Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias, Universidad de la República. Correo electrónico: bzabaleta@fcien.edu.uy

³ Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias, Universidad de la República. Correo electrónico: achkar@fcien.edu.uy

El cambio en el régimen de eventos de inundaciones en espacios urbanos es una problemática global actual, la cual genera una amenaza y un riesgo continuo para la población local. Frente al cambio climático se prevé un incremento en la ocurrencia de eventos de inundación y, por lo tanto, en las consecuencias para la población afectada (Jha *et al.*, 2012; Xiao *et al.*, 2016; Birkmann *et al.*, 2010). En general, las inundaciones son causadas por precipitaciones intensas o de gran volumen, pero también pueden ser resultado de otros factores como la reducción de la capacidad de infiltración del suelo, la impermeabilización y/o la saturación de la napa freática, cuestiones que están en relación directa con el uso del suelo (Aliste *et al.*, 2012; Espinosa *et al.*, 2018; Ferreira y Robaina, 2012; García *et al.*, 2018).

El cambio climático ha generado un aumento en la frecuencia de eventos extremos (Kim *et al.*, 2018) con comportamientos diferenciales en los territorios; algunas regiones presentan un incremento en las precipitaciones, tanto en eventos puntuales y/o en la precipitación acumulada; y en otros se enfrentan períodos de sequía (Jia *et al.*, 2019; Lal *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2020). El cambio climático puede tener fuertes impactos en el ciclo hidrológico a través de cambios en la precipitación, evapotranspiración y la humedad del suelo por las temperaturas crecientes, estas alteraciones además afectarían particularmente a las zonas de humedales (Ioris, 2014; Jia *et al.*, 2019; Weiskopf *et al.*, 2020).

En América Latina se han observado eventos climáticos extremos, como inundaciones, sequías, lluvias torrenciales y variaciones de la temperatura en los últimos años (Santelices y Rojas, 2016). Progresivamente se consolida la hipótesis que establece como causa del cambio climático al calentamiento global, que produce perturbaciones de ecosistemas y paisajes, generando un impacto importante sobre la producción económica (Arneth *et al.*, 2019; Bidegain *et al.*, 2017; Caorsi *et al.*, 2014, Jia *et al.*, 2019), así como sobre las condiciones sociales de la población (Aliste, 2012; Jaque *et al.*, 2017). Frente a este panorama, la generación de estrategias y políticas públicas para minimizar el impacto de eventos extremos en el sector productivo, y también en los procesos de urbanización, son necesarias para una adaptación sustentable al cambio climático (Cruz *et al.*, 2018; Bidegain *et al.*, 2012; Espinosa *et al.*, 2018; Jaque *et al.*, 2017).

Se han desarrollado estudios que señalan un aumento en las precipitaciones (acumulada y por eventos) durante las temporadas de primavera-verano en la Cuenca del Plata, los cuales se relacionan con el cambio climático (Bidegain *et al.*, 2017). La tendencia del incremento en las precipitaciones se refleja también en la región del Bioma Pampa según estudios en Argentina, donde además se intensificó significativamente la agricultura. El conjunto de las transformaciones mencionadas ha generado importantes cambios en el ciclo hidrológico (García *et al.*, 2018).

Así, como se vincula el cambio climático con el aumento de eventos extremos, los usos del suelo de una cuenca también pueden intervenir favoreciendo o reduciendo estos eventos, en cuanto se relacionan directamente con el aumento o la disminución de la infiltración de agua al suelo (Reina y Roselló, 2019; Bernal, 2017). En los territorios del Bioma Pampa se ha experimentado en las últimas décadas una intensa transformación en los usos del suelo, donde se han desplazado pastizales y pasturas por monocultivos anuales de raíces cortas; principalmente soja y maíz (García *et al.*, 2018). Asimismo, el manejo tradicional con arado se modificó por el uso de la siembra directa, la implementación de esta técnica está impulsada por la intensificación y expansión de la agricultura en la región.

La siembra directa se basa en el uso de maquinaria específica y semillas transgénicas con tolerancia al glifosato, un herbicida muy usado con esta técnica, generando pérdida de la cobertura vegetal y la actividad biológica asociada durante ciertos períodos (Redes, 2011). Aunque se trata de mantener un porcentaje de la superficie de residuos de cultivos o pasturas anterior en el momento de la siembra (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2009) se ha constatado en varios casos que se expone al suelo a procesos erosivos, reduce la capacidad de infiltración, aumenta la compactación y disminuye la evaporación del suelo (Vglizzo *et al.*, 2016; García *et al.*, 2018). Como consecuencia de estos procesos puede aumentar la escorrentía superficial en momentos de precipitaciones, que conlleva a la disminución en el tiempo de respuesta de los ríos frente a precipitaciones y por lo tanto puede aumentar el riesgo de inundación para la población local (Aguayo *et al.* 2006).

En este escenario de cambio climático y de intensificación productiva se prevé que las sociedades tendrán que enfrentar con mayor frecuencia eventos climáticos extremos y sus consecuencias (Jha *et al.*, 2012; Xiao *et al.*, 2016). También los procesos de urbanización acelerada hacia las periferias sobre suelos no aptos para tal fin, favorece la impermeabilización, disminuye la infiltración y aumenta la escorrentía superficial (Achkar *et al.*, 2004). Este impacto todavía es poco estudiado (Reina y Roselló, 2019). En las planicies de inundación aumentaría la frecuencia de inundaciones, incrementando la vulnerabilidad de los habitantes de esas áreas (Rodgers, 1993). Ya que las zonas de riesgo son producto de la interacción entre la dimensión físico biológica y socioeconómica del ambiente, el riesgo no es solo el resultado de un proceso natural, es el resultado del sistema social y sus vulnerabilidades frente a los procesos naturales (Alcántara-Ayala, 2002; Freitas *et al.*, 2019).

La gestión de las cuencas juega un rol central para enfrentar eventos extremos y disminuir la vulnerabilidad de su población, entendiendo que la cuenca forma un sistema hídrico donde todos los componentes están relacionados entre sí (Camarasa *et al.*, 2018; Ferrando, 2006; García *et al.*, 2007). Por lo cual, es necesario una adaptación multidimensional teniendo en cuenta todas las partes que intervienen en el funcionamiento de la cuenca para disminuir las causas de los eventos extremos como las inundaciones. La actividad humana no puede quedar afuera de este análisis, ya que influye al funcionamiento de las cuencas, donde se ha mostrado que el cambio del uso de suelo puede impactar al clima (Lawrence *et al.*, 2016). Por lo cual, frente al escenario de cambio climático es imprescindible generar estrategias de manejo de las cuencas, que consideren como eje central la adaptación multidimensional y que logre también una prevención de desastres en áreas urbanas a través de un ordenamiento territorial sustentable (Conde-Álvarez y Saldaña-Zorilla, 2007; Nightingale *et al.*, 2019; Schön *et al.*, 2018).

La problemática del incremento de las inundaciones se puede observar por ejemplo en la ciudad de San José de Mayo (Uruguay), donde en los últimos años ha aumentado la frecuencia y el nivel de altura del agua en el Río San José en eventos de crecida, generando la necesidad de evacuar barrios enteros en momentos de inundaciones (Sistema Nacional de Emergencias, 2017). Con la finalidad de identificar posibles causas de esta realidad, se analiza a nivel cuenca los factores que favorecen el fenómeno, considerando al cambio climático y las transformaciones en los usos del suelo. En este trabajo se evalúa la incidencia de la variabilidad de eventos extremos de precipitación, precipitaciones acumuladas e intensificación productiva en relación con el caudal del río, con el fin de comprender la ocurrencia de eventos de inundación en la ciudad de San José de Mayo.

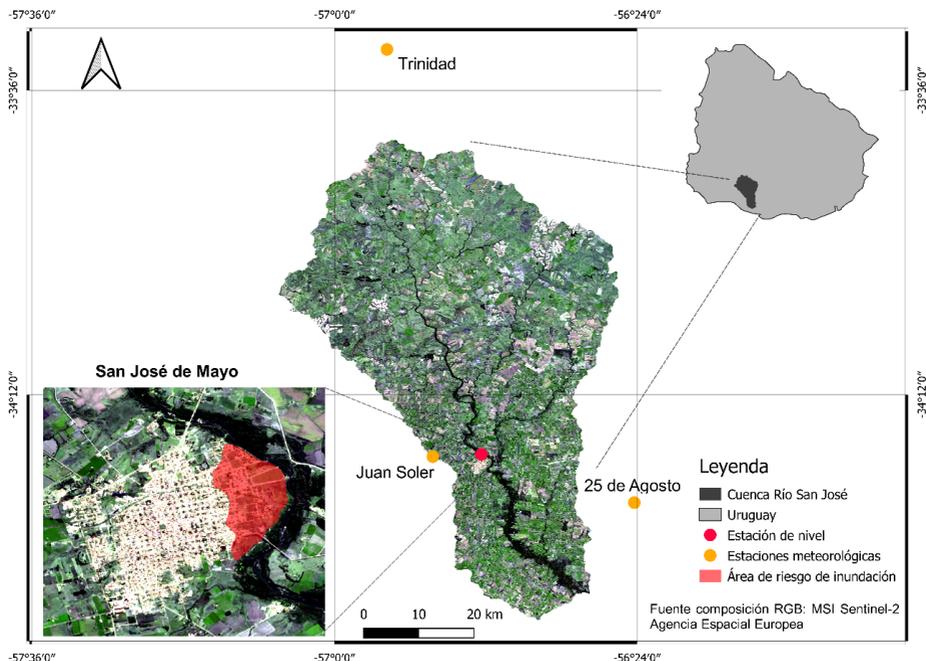
Las preguntas orientadoras son: ¿en el período considerado los eventos de inundación aumentaron? ¿la variabilidad de las precipitaciones explica el aumento de los eventos de inundaciones? ¿los cambios en el uso de suelo en la cuenca aportan a la explicación de la variabilidad de eventos de inundación en la ciudad de San José de Mayo?

Área de estudio

Uruguay se encuentra en el Bioma Pampa, en la zona baja de la cuenca del Río de la Plata, su ubicación geográfica es 30°-35° de latitud sur y de 56°-58° de longitud oeste. El clima es templado subtropical que no presenta una estación lluviosa, ya que el promedio de las precipitaciones se distribuye a lo largo del año (Achkar *et al.*, 2016).

El área de estudio es la cuenca del Río San José, que ocupa una superficie de 3.565 Km² y cuyo curso principal se extiende aproximadamente 180 km (Figura N°1). En conjunto con los arroyos Santa Lucía Chico y Santa Lucía Grande forman la Macrocuenca del Santa Lucía. La cuenca del Río San José está conformada por más de 40 subcuencas, de los cuales veintidós tienen una superficie entre 30 y 500 km², de los cuales 18, presentan formas alargadas a ligeramente alargadas. Se desprende que las cuencas más alargadas tienden a una respuesta más difusa, en respuesta de tormentas con altos caudales, que las cuencas compactas (redondeadas). La cuenca drena una superficie compuesta de rocas cristalinas muy antiguas (Paleoproterozoico) que se extienden hacia el noroeste de la ciudad de San José, hasta la Sierra de Mahoma (Cizalla Cañada

Figura N°1.
La Cuenca del San José y sus estaciones meteorológicas.



Fuente: Elaboración propia

Tabárez) (Preciozzi *et al.*, 2004). La clasificación morfológica (Strahler) del río llega al orden 6 y mantiene este orden hasta la desembocadura, presenta un cauce rectilíneo. Se encuentra en el sur del país, donde el relieve se caracteriza por colinas de pendientes fuertes de 6 a 18% al norte y lomadas redondeadas de pendientes moderadas a suaves de 1,5 a 3,5% en el centro sur. La cuenca cuenta además con importantes planicies fluviales asociadas a bañados permanentes y estacionales, donde los suelos predominantes son vertisoles y brunsoles (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 1994). La ciudad más grande de la cuenca es la ciudad de San José de Mayo con 36.743 habitantes, que está ubicado en la cuenca baja y forma parte del Sistema Urbano Metropolitano de Montevideo.

Material y Métodos

La estrategia metodológica se basó en analizar la respuesta de la cuenca del Río San José desde su hidrología a los factores climáticos y meteorológicos e identificar otros factores que favorecen la ocurrencia de eventos de inundación en la ciudad de San José de Mayo. Para ello se evaluó la variabilidad de las precipitaciones y niveles del Río San José en el período 1987-2017, periodo de 30 años que permite evaluar tendencias climáticas (Organización Meteorológica Mundial, 2011). Asimismo, se identificó el tiempo de respuesta del nivel del río con respecto a las precipitaciones, para lo cual se exploró la relación entre dichas variables. También, se evaluaron las modificaciones en los usos del suelo a través de un Sistema de Información Geográfico, verificándolo en el campo.

Precipitaciones

Para analizar la variabilidad de las precipitaciones en la cuenca se trabajó con series históricas de precipitación diaria acumulada durante el período 1987-2017, correspondientes a las estaciones meteorológicas de Juan Soler, 25 de Agosto y Trinidad (Figura N°1), se utilizaron los registros de dichas estaciones debido a que se encuentran dentro de la cuenca o muy próximas y presentan registros durante todo el período de trabajo. La información fue proporcionada por el Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET).

En el contexto de cambio climático actual podrían darse tendencias de aumento de las precipitaciones tanto acumuladas como eventos extremos, con diferencias estacionales (Bidegain *et al.*, 2017). El análisis realizado exploró posibles tendencias estacionales a dos niveles, por un lado considerando precipitaciones acumuladas por estación y por otro la sumatoria estacional de eventos diarios extremos. Estos fueron determinados a partir del índice R20 (Haylock *et al.*, 2006; Zhang *et al.* 2011), el cual considera como evento diario extremo aquellos casos donde la precipitación diaria acumulada supera los 20 mm y ha sido utilizado recientemente para la Cuenca del Plata por Bidegain *et al.* (2017).

Para evaluar la presencia de tendencias en las series de precipitaciones acumuladas mensuales y de la sumatoria estacional de R20, se aplicó el test Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975). El cual es un test no paramétrico que evalúa comportamientos monótonos de series de datos y ha sido ampliamente utilizado para evaluar tendencias en series temporales hidrometeorológicas (Alvariño *et al.*, 2018; Caorsi *et al.*, 2018; Hirsch y Slack, 1984; Sarricolea *et al.*, 2017).

Niveles del Río San José

Para el análisis de la variabilidad de los niveles del Río San José se trabajó con una serie histórica de niveles diarios correspondiente al período 1987-2017, medido en la altura de la ciudad de San José de Mayo (Figura N°1) proporcionada por la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA). La finalidad del análisis fue evaluar el posible incremento en la frecuencia de eventos de crecida del Río San José, en términos generales y estacionales. Se consideraron como eventos dos niveles: el nivel de crecida a los 5 m; donde el río se encuentra con su canal de crecida completo sin desbordamiento y como nivel de alerta de desbordamiento del canal a los 7 m; históricamente cuando alcanzó este nivel se registraron evacuaciones. A partir de la determinación de dichos niveles, se generaron dos series categóricas dicotómicas (evento/no evento), una considera los eventos diarios superiores a 5 m y la otra superiores a 7 m. Estas series permitieron obtener las sumatorias de eventos mensuales (utilizada para la evaluación general) y estacionales. Con las cuales se exploró la presencia de tendencias mediante el test Mann-Kendall.

Precipitaciones-Niveles

Para el análisis de la relación entre las precipitaciones y los niveles del río, y del tiempo de respuesta luego de un evento de precipitación, en primer lugar, se evaluó la existencia de diferencias significativas entre las series de precipitaciones y niveles que presentaron tendencias, para ello se utilizó el test no paramétrico de Kruskal-Wallis. Asimismo, se evaluó la existencia de asociaciones estadísticamente significativas, en este caso a partir del test no paramétrico de Spearman (Legendre & Legendre, 1998). Luego, se vinculó con la intensidad de uso del suelo con la finalidad de identificar como afectan los cambios de uso del suelo a la respuesta del nivel del río luego de eventos de precipitación (Navarrete *et al.*, 2009; Nosetto *et al.*, 2015). Para ello se dividieron las series históricas de precipitaciones y niveles diarios en tres períodos de 10 años, que representan momentos claves en la transformación de los usos del suelo en el país (Gazzano *et al.*, 2019).

Los períodos determinados fueron: 1987-1996 considerado como pre-ingreso a la intensificación productiva, donde se mantenían los usos y manejo de las unidades productivas tradicionales. 1997-2006 representa el período de comienzo de la intensificación productiva, donde si bien hubo profundas transformaciones en los usos del suelo se mantenía el manejo tradicional de los cultivos. 2007-2017 es el período con la intensificación productiva ya consolidada, donde predominan los cultivos cerealeros y el manejo de las unidades productivas es totalmente dominado por la siembra directa (Achkar *et al.*, 2016).

Para identificar relaciones que no son instantáneas entre los eventos de precipitación en las diferentes estaciones meteorológicas y el tiempo de respuesta de los niveles del Río en la ciudad de San José, se trabajó con los tres períodos seleccionados y se realizó para cada estación meteorológica el análisis de correlación cruzada, que permite obtener resultados que consisten en un valor de significancia (p), magnitud (Z) y su variación en función de un retraso temporal (lag) (Berbery y Barros, 2002; Camilloni & Barros, 2000; Diaz, 2014).

Clasificación de usos del suelo

La intensificación productiva modifica sustancialmente el ciclo hidrológico y por lo tanto se vincula directamente con la pérdida de la capacidad de regulación del suelo ante posibles even-

tos de inundación (Benavides *et al.*, 2018; Rollán y Bachmeier, 2014; Haghazari *et al.*, 2015). Para detectar las principales transformaciones de los usos del suelo en la cuenca del Río San José en el período de estudio, se trabajó con imágenes satelitales del 1987 y 2017. Para ello se descargó del sitio web <https://earthexplorer.usgs.gov/> una imagen TM/Landsat-5 del 09/06/1987 con una resolución espacial de 30x30 metros y del sitio web <https://scihub.copernicus.eu/dhus/> una imagen MSI/Sentinel-2 capturada el 10/06/2017 con una resolución espacial de 10x10 metros.

Se realizaron clasificaciones supervisadas mediante el método de distancias mínimas, utilizando el plugin *Semi-Automatic Classification* del software libre Quantum GIS. Este método calcula la distancia Euclíde entre la reflectancia de los píxeles de la imagen y los píxeles de entrenamiento a los cuales se les asigna una clase de identidad conocida. Luego, cada píxel de la imagen es asignado a la clase con las reflectancias más cercanas a las suyas (Congedo, 2016; Richards & Jia, 2006). Para ello se consideraron las reflectancias de las bandas del azul (~490nm), verde (~560nm), rojo (~665nm) e infrarrojo cercano (~865nm). Se definieron 4 clases que corresponden a los usos del suelo: Bosque nativo y forestación ya que no se encuentran grandes superficies forestales que distorsionen el funcionamiento hidrológico de la cuenca. Cultivos donde se incluyeron parcelas de praderas plantadas con fines forrajeros; ya que sustituyen por completo la cobertura vegetal y presentan una firma espectral similar a los cultivos, también se incluyeron zonas de suelo desnudo, debido a que las características de la cuenca determinan que estas superficies se encuentran asociadas a unidades agrícolas. Pastizales representa la clase más genérica ya que está conformada por pastizales de diferente productividad, además de zonas húmedas y con matorrales. Por último, la clase Infraestructura incluyó zonas industriales, residenciales y de caminería.

La clasificación de usos del suelo de 2017 fue validada mediante la determinación del nivel de acierto. Para lo cual se realizó una campaña de campo en otoño del 2019 que consistió en un recorrido donde se tomaron 122 puntos de control ubicados a ambos lados de la caminería y seleccionados de acuerdo con su uso del suelo, tal que se consideró un 25% de la totalidad de puntos de control para cada clase. A partir de este recorrido se realizó una matriz de confusión que arrojó un porcentaje de acierto del 87% donde los mayores errores estuvieron asociados a la confusión entre pastizales y cultivos ya que esta última incluye las praderas plantadas y en áreas de baja productividad presentan una firma espectral similar a los pastizales. Esta validación también permitió conocer la respuesta espectral de los principales usos del suelo, tal que se logró orientar la clasificación de 1987.

Resultados

Se presentan los resultados obtenidos en relación con las tendencias de precipitación, niveles del río, y la vinculación entre sí. Además, se muestran los cambios de uso del suelo de la cuenca entre el 1987 y 2017.

Precipitaciones

El análisis realizado a partir de la sumatoria estacional de precipitaciones acumuladas arrojó resultados estadísticamente significativos de tendencia creciente en invierno para las estaciones 25 de Agosto y Trinidad. Juan Soler presentó una tendencia parcialmente significativa también en invierno (Cuadro N1).

Cuadro N°1.

Análisis de Mann-Kendall de acuerdo con las sumatorias estacionales de las precipitaciones acumuladas, valores de significancia (p) y magnitud (Z). Casos estadísticamente significativos ($p < 0,05$) en rojo, casos parcialmente significativos ($p \geq 0,05 \leq 0,1$) en negrita

| Estación | Juan Soler | | 25 de Agosto | | Trinidad | |
|-----------|------------|--------------|--------------|--------------|----------|--------------|
| | Z | p | Z | p | Z | p |
| verano | 0,68 | 0,496 | 0,84 | 0,399 | 0,24 | 0,808 |
| otoño | 0,24 | 0,808 | 0,84 | 0,399 | 0,88 | 0,381 |
| invierno | 1,85 | 0,065 | 3,16 | 0,002 | 2,61 | 0,009 |
| primavera | 0,03 | 0,974 | 0,60 | 0,549 | 0,54 | 0,593 |

Fuente: Elaboración propia

La determinación de eventos de precipitación fuerte a partir del índice R20 generó resultados similares en cuanto a las tendencias identificadas para las acumuladas mensuales, ya que se detectaron tendencias de aumento de dichos eventos durante el invierno. Sin embargo, las mayores significancias y magnitudes fueron en Juan Soler y 25 de Agosto, mientras que Trinidad fue parcialmente significativa (Cuadro N°2). En ambos análisis, la estación que presentó mayor magnitud en la tendencia fue 25 de Agosto.

Cuadro N°2.

Análisis de Mann-Kendall de acuerdo a las sumatorias estacionales de R20. Casos estadísticamente significativos ($p < 0,05$) en rojo, casos parcialmente significativos ($p \geq 0,05 \leq 0,1$) en negrita

| Estación | Juan Soler | | 25 de Agosto | | Trinidad | |
|-----------|------------|--------------|--------------|--------------|----------|--------------|
| | Z | p | Z | p | Z | p |
| verano | 0,12 | 0,908 | 0,33 | 0,745 | 0,41 | 0,679 |
| otoño | 0,10 | 0,921 | 0,10 | 0,918 | 1,07 | 0,283 |
| invierno | 2,06 | 0,039 | 3,05 | 0,002 | 1,72 | 0,085 |
| primavera | 0,13 | 0,896 | 0,36 | 0,719 | 0,51 | 0,607 |

Fuente: elaboración propia

Niveles del Río San José

La ocurrencia de eventos de niveles superiores a 5 y 7 metros del Río San José presentó tendencias crecientes significativas en invierno. La magnitud y significancia de los eventos mayores a 5 metros resultó superior a la identificada del nivel de 7 metros (Cuadro N°3).

Cuadro N°3.

Análisis Mann-Kendall realizado a partir de la sumatoria estacional de eventos donde el Río San José alcanzó los 5 y 7 metros respectivamente. Casos estadísticamente significativos ($p < 0,05$) en rojo.

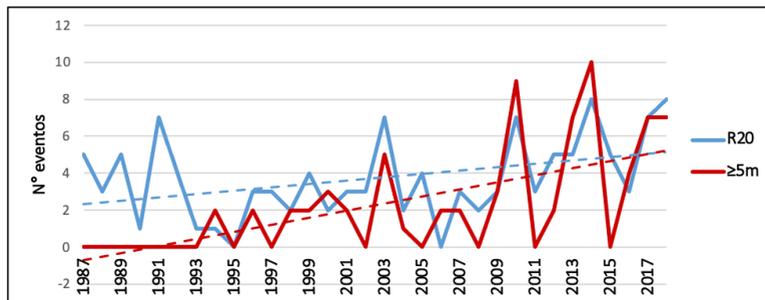
| Estación | 5 metros | | 7 metros | |
|-----------|----------|------------------|----------|--------------|
| | Z | p | Z | p |
| verano | 0,60 | 0,551 | 0,17 | 0,865 |
| otoño | 0,00 | 1,000 | 1,16 | 0,244 |
| invierno | 3,64 | <0,001 | 3,41 | 0,001 |
| primavera | 1,16 | 0,245 | 1,46 | 0,144 |

Fuente: elaboración propia

Los resultados obtenidos de los análisis de tendencia sugieren que la magnitud en la tendencia de los niveles del río es superior a todas las detectadas para las series de precipitación. La sumatoria de eventos diarios superiores a 20 mm (R20) durante el invierno y de los eventos superiores a 5 metros en la estación Juan Soler presentaron diferencias estadísticamente significativas, donde el test no paramétrico Kruskal-Wallis tuvo un p -valor 0,002. Se correlacionaron de forma significativa ($p = 0,042$) con un $R_s=0,36$ de acuerdo con el test no paramétrico de Spearman. En cuanto a las tendencias, R20 tuvo una pendiente de 0,09 mientras que en la serie de niveles superiores a 5 metros fue de 0,19. Las estaciones de Trinidad y 25 de Agosto tuvieron un comportamiento similar a Juan Soler, se presentan los resultados únicamente de ésta por ser la más próxima a la ciudad de San José de Mayo (Figura N2).

Figura N°2.

Sumatoria de eventos diarios de precipitación (línea continua en azul) superiores a 20mm en la estación Juan Soler y de nivel del Río San José (línea continua en rojo) superiores a 5 m, y sus respectivas líneas de tendencia (líneas punteadas).



Fuente: Elaboración propia

Correlación cruzada precipitación-niveles Río San José

Los resultados del análisis de correlación cruzada señalan que existe una asociación entre las precipitaciones registradas en las tres estaciones meteorológicas y los niveles del río, que varía según los períodos evaluados. En el período 1987-1996 se observa que la primera correlación detectada sucede al primer día luego de las precipitaciones en las estaciones Juan Soler y 25 de Agosto, sin embargo, la mayor magnitud y significancia tuvo lugar al 3er día. Por otra parte, la estación Trinidad tuvo su primera correlación significativa al 2do día y la mayor al 4to (Cuadro N°4).

En el período 1997-2006 se observa una disminución en el retraso; 25 de Agosto presentó una correlación significativa el mismo día de la precipitación; sin embargo, su magnitud fue mínima. Por su parte, Juan Soler y Trinidad lo hicieron al 1er día. En cuanto al máximo de la magnitud, se alcanzó al 2do día de ocurrida la precipitación en las tres estaciones (Cuadro N°4).

En el período 2007-2017, las tres estaciones presentaron la primera correlación significativa el día 0 y las mayores magnitudes al 2do día. En este período se detectaron las mayores magnitudes y menores valores p (Cuadro N°4).

Comparativamente, Juan Soler tuvo sus mayores magnitudes y menores p en el 3er período. 25 de Agosto y Trinidad si bien presentaron su mayor magnitud y menor p en el 2do período,

en promedio de los 5 días de retraso evaluados, fueron superiores en el 3er período. Trinidad fue la que presentó los mayores retrasos en sus correlaciones máximas en los tres períodos, asimismo una vez alcanzada su mayor magnitud fue la estación que la sostuvo por más tiempo (Cuadro N°4).

Cuadro N°4.

Análisis de correlación cruzada entre las series de precipitación y nivel del Río en San José en los tres períodos de estudio. Tiempo de diferencia de los niveles con respecto a las precipitaciones (retraso), magnitud y significancia (p) para las tres estaciones meteorológicas. Primer resultado con $p < 0,01$ (azul), mayor magnitud y menor p (rojo)

| Retraso (días) | Juan Soler | | 25 de Agosto | | Trinidad | |
|-------------------|-------------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
| | Magnitud | p | Magnitud | p | Magnitud | p |
| | 1987-1996 | | | | | |
| 0 | -0,01 | 5E-01 | -0,01 | 5E-01 | -0,02 | 2E-01 |
| 1 | 0,05 | 4E-03 | 0,05 | 3E-03 | 0,00 | 9E-01 |
| 2 | 0,26 | 4E-51 | 0,24 | 6E-46 | 0,16 | 3E-20 |
| 3 | 0,42 | 5E-144 | 0,42 | 1E-138 | 0,39 | 1E-118 |
| 4 | 0,37 | 6E-106 | 0,37 | 1E-106 | 0,39 | 5E-121 |
| | 1997-2006 | | | | | |
| 0 | 0,04 | 3E-02 | 0,05 | 2E-03 | 0,03 | 5E-02 |
| 1 | 0,20 | 5E-32 | 0,28 | 6E-62 | 0,24 | 7E-46 |
| 2 | 0,37 | 7E-114 | 0,49 | 1E-205 | 0,51 | 2E-226 |
| 3 | 0,35 | 9E-100 | 0,43 | 5E-153 | 0,47 | 8E-189 |
| 4 | 0,21 | 6E-36 | 0,25 | 2E-47 | 0,26 | 5E-54 |
| | 2007-2017 | | | | | |
| 0 | 0,12 | 4E-12 | 0,12 | 3E-11 | 0,10 | 2E-08 |
| 1 | 0,32 | 2E-73 | 0,32 | 4E-74 | 0,27 | 5E-55 |
| 2 | 0,50 | 5E-195 | 0,50 | 3E-195 | 0,47 | 2E-171 |
| 3 | 0,46 | 2E-162 | 0,46 | 3E-157 | 0,46 | 4E-167 |
| 4 | 0,32 | 2E-77 | 0,32 | 8E-76 | 0,34 | 3E-85 |

Fuente: Elaboración propia

Clasificación de uso del suelo

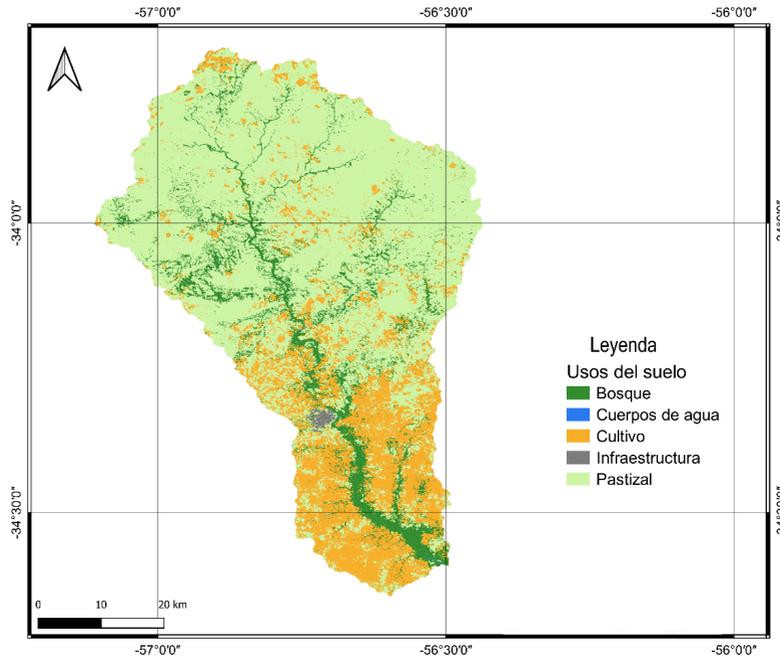
Los resultados de las clasificaciones de usos del suelo a partir de imágenes satelitales del año 1987 y 2017 sugieren que hubo una gran transformación en los usos del suelo, principalmente asociada a la expansión de monocultivos cerealeros y a la disminución de áreas destinadas a pastizales mejorados y praderas para la actividad ganadera-lechera.

En el año 1987 los pastizales y praderas naturales predominaban en el uso del suelo de la cuenca del Río San José, cubrían aproximadamente el 69,5% de la superficie total (356.7 ha), y se asociaban principalmente a la producción forrajera. Mientras que el área destinada a cultivos cubría un 15,6% (Cuadro N°5). Por otro lado, los bosques ocupaban un 14,6% de la cuenca. Mientras que los cuerpos de agua (ríos, arroyos, embalses, tajamares) representaban el 0,1% y

la infraestructura 0,3%, esta última incluye áreas urbanas consolidadas y dispersas, así como también la caminería (Cuadro N°5). La superficie destinada a cultivos se ubicaba principalmente en la zona sur de la cuenca, en la zona norte predominaban los pastizales y praderas vinculados a ganadería extensiva (Figura N°3).

Figura N°3.

Clasificación de usos del suelo al 09/06/1987 en la cuenca del Río San José.

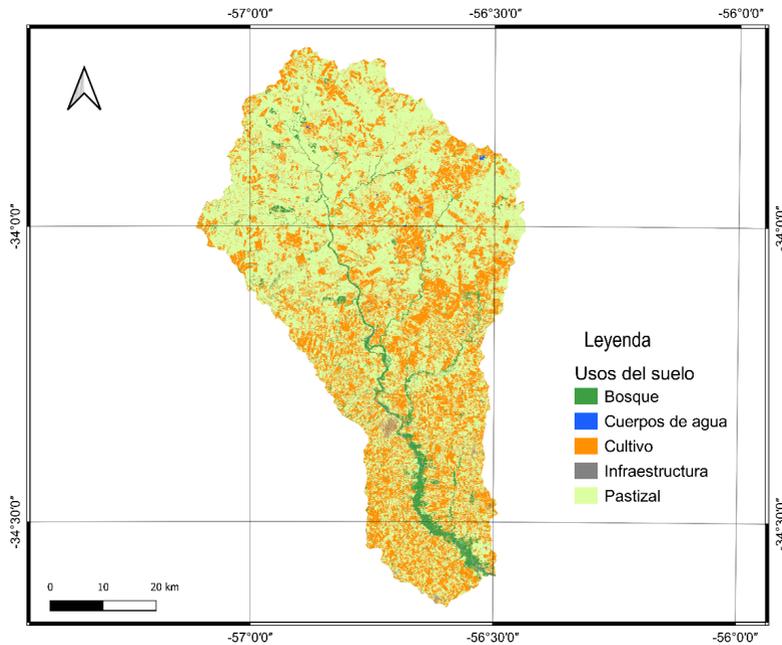


Fuente: Elaboración propia. Clasificación supervisada realizada mediante método de distancias mínimas. Imagen Landsat-5 TM (NASA)

En 2017, de acuerdo con la campaña de validación, la clasificación realizada cuenta con un 87% de acierto y el uso predominante son los monocultivos cerealeros (soja, maíz, sorgo). Los cuales cubren aproximadamente el 34,8% de la superficie total de la cuenca, esta categoría está integrada por suelos cultivados y suelos desnudos (Cuadro N°5). En comparación al 1987 se destaca el aumento de la superficie cultivada en el norte de la cuenca. La categoría pastizales y praderas redujo su extensión en comparación al año 1987, ocupando un 58,4% de la cuenca (Cuadro N°5). Por su parte, los bosques también bajan su presencia y cubren el 5,9%, (Cuadro N°5). Los cuerpos de agua y la infraestructura no mostraron grandes diferencias en su superficie, si aumentaron la superficie de 0,1% a 0,2% los cuerpos de agua y 03% a 06% la infraestructura (Cuadro N°5), (Figura N°4).

Figura N°4.

Clasificación de usos del suelo al 10/06/2017 en la cuenca del Río San José.



Fuente: Elaboración propia. Clasificación supervisada realizada mediante método de distancias mínimas. Imagen Sentinel-2 MSI (ESA)

Cuadro N°5.

Clasificación de usos del suelo años 1987 y 2017, superficies en porcentajes según el área del total de la cuenca del Río San José

| Uso (%) | 1987 | 2017 |
|-----------------------|------|------|
| Bosque | 14,6 | 5,9 |
| Cultivos | 15,6 | 34,8 |
| Pastizales y praderas | 69,5 | 58,4 |
| Cuerpos de agua | 0,1 | 0,2 |
| Infraestructura | 0,3 | 0,6 |

Fuente: Elaboración propia

Discusión

Se evaluó la variabilidad de las precipitaciones y niveles del Río San José en un período de 30 años, considerando precipitaciones acumuladas estacionales y eventos diarios superiores a 20mm (R20). En el período de estudio (1987-2017), surgen evidencias de intensificación de precipitaciones acumuladas, así como de R20 durante el invierno en las estaciones Juan Soler, 25 de Agosto y Trinidad. Lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Bidegain et al. (2017) que identifican aumento de precipitaciones acumuladas y de R20 para toda la Cuenca del Plata en el período 1971-2015. Sin embargo, las tendencias reportadas corresponden a las estaciones

primavera-verano. Además, Bidegain *et al.* (2012) reportaron tendencias crecientes para las precipitaciones en el oeste del país. Castaño *et al.* (2007) también muestran un incremento de las precipitaciones durante la temporada cálida, analizando el Bioma Pampa en Brasil, Argentina y Uruguay, comparando los períodos 1931-1960 con 1971-2000.

La tendencia de aumento de precipitaciones identificada en este trabajo, es coincidente con las tendencias generales encontradas para la región, y difiere en la estacionalidad de los eventos. Estos resultados pueden considerarse complementarios a lo encontrado en otras investigaciones ya que se podría asociar a efectos de parches o heterogeneidad espacial de eventos extremos y acumulados (Frich *et al.*, 2002).

La ocurrencia de eventos de nivel del río, superiores a 5 y 7 m también arrojó una tendencia incremental en invierno durante el período de estudio, pero su magnitud fue menor a la detectada en invierno para R20. Por lo cual, la tendencia de los niveles del río no podría explicarse únicamente por el aumento en las precipitaciones. En este sentido, el análisis de correlación cruzada realizado presenta evidencias que podrían vincular el incremento de los eventos de inundación con los cambios en los usos del suelo. Dado que se detectó un cambio en el comportamiento hidrológico de la cuenca en el período 2006-2017, donde la respuesta del nivel del río luego de las precipitaciones, es más inmediata y presenta mayor magnitud de correlación que durante los períodos 1987-1996 y 1997-2005. Este fenómeno podría explicarse por el aumento de la escorrentía superficial, favorecido por la disminución en la capacidad de infiltración del suelo que supone el uso agrícola intensivo (Holman *et al.*, 2003; Viglione *et al.*, 2016), consolidado en la cuenca del Río San José desde comienzos del período 2006-2017.

En la Cuenca se verificó que ha aumentado la superficie cultivada en la zona norte. En 1987 la superficie destinada a cultivos se ubicaba únicamente en la región sur, mientras que en la norte predominaban los pastizales vinculados a ganadería extensiva. Además, desaparecen bosques relacionados a los montes nativos cerca de los cursos de agua y las nacientes. El avance de la frontera agrícola viene acompañado de la transformación en los usos del suelo y de cambios en el manejo de los cultivos, donde se destaca la incorporación de la siembra directa (García *et al.*, 2010). Esta técnica pretende aumentar la producción por hectárea facilitando la agricultura continua a partir de la aplicación de insumos tecnológicos (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2009). Sin embargo, la agricultura continua genera impactos ambientales, como la compactación del suelo, procesos de erosión y la contaminación por glifosato (Chamorro y Sarandón, 2017; Gaitán *et al.*, 2017; REDES, 2011).

A mediados de la década de 1990 la siembra directa se extendió en todo el país, intensificando su uso a partir del año 2002, cuando empezó un desarrollo de intensificación y expansión agrícola sobre tierras que no se usaban anteriormente para tal fin, basándose en una nueva demanda mundial por *commodities* agrícolas como la soja (García *et al.*, 2010). También en el departamento de San José se puede observar esta tendencia, en el 2010 la soja alcanza la mitad de los cultivos departamentales (Perrachón, 2011). Coincide con la realidad regional, donde se ha podido observar, en la Pampa Argentina, que se han desplazado pastizales y pasturas por cultivos intensivos cereales; principalmente soja, lo cual se estima que ha agravado los procesos erosivos en las últimas décadas (García *et al.*, 2018; Gaitán *et al.*, 2017). Teóricamente, la siembra directa de cultivos de verano debe sucederse por cultivos de invierno o forrajeros que eviten la erosión y mantengan la

infiltración en el suelo (Pinto y Piñeiro, 2018). Sin embargo, no siempre es el caso, en la clasificación de usos del suelo de julio de 2017 en la Cuenca del Río San José y en las salidas de campo se verificaron amplias superficies de suelo desnudo.

En el Bioma Pampa se pudo comprobar que las principales causas antrópicas de la erosión han sido el monocultivo y la simplificación en la rotación de los cultivos, la expansión de la frontera agrícola sobre áreas de bosque nativo, los cambios en el uso de suelo y el sobrepastoreo (Gaitán *et al.*, 2017). Asimismo, las transformaciones en el uso de suelo, producto de la intensificación agrícola, han generado importantes cambios en el ciclo hidrológico (García *et al.*, 2018). En este sentido Viglizzo *et al.* (2016) afirman que la pérdida de la cobertura vegetal y la actividad biológica asociada, expone al suelo a procesos erosivos, reduce la capacidad de infiltración y aumenta la compactación. Estos fenómenos en conjunto con los tipos de suelos pueden favorecer el aumento en volumen y velocidad del escurrimiento superficial (Alaoui *et al.*, 2018). En particular la Cuenca del Río San José ha experimentado una intensificación agrícola donde predominaban los cultivos de raíces cortas. Dicho proceso se ha expandido sobre suelos con altos contenidos de arcillas, las cuales desprovistas de cobertura vegetal de raíces profundas se caracterizan por tendencias a la compactación y por tanto reducir su capacidad de infiltración, asimismo cuando no existe cobertura vegetal asociada generan una capa superficial impermeable (Hamza y Anderson, 2005; Vallejos *et al.*, 2014). Estos fenómenos en conjunto con la compactación del suelo, característica de la siembra directa, determinan un aumento en la escorrentía superficial, y por lo tanto disminuyen la capacidad de regulación de inundaciones.

Resumiendo, resalta que tanto el aumento de la precipitación como el aumento del nivel de caudal suceden en invierno, también es el momento con mayor superficie con suelo desnudo por el manejo de los cultivos. Esta coincidencia temporal constituye una evidencia de que los usos del suelo explican, al menos en parte, la diferencia entre la tendencia de precipitación y de niveles altos de caudal. Esta realidad coloca en primer nivel de la discusión sobre las inundaciones, la necesidad de evitar grandes periodos de tiempo de suelos descubiertos, especialmente en invierno. Así como monitorear y controlar la compactación superficial y subsuperficial de los suelos, frente a un panorama de cambio climático e intensificación agraria genera una necesidad de adaptación, la cual requiere unificar esfuerzos entre los actores vinculados, y también un seguimiento o fiscalización por parte de las autoridades competentes.

Conclusión

En la ciudad de San José de Mayo en el periodo 1987 -2017, se registra una tendencia creciente significativa en invierno en los eventos donde el Río San José encuentra su canal de crecida completo y con desbordes hacia las zonas más bajas de la ciudad. Estas tendencias se manifiestan tanto para los niveles superiores a 5 metros, como para los 7 metros cuando se deben evacuar a los residentes de las zonas bajas de la ciudad. Si bien las precipitaciones ocurridas presentan un leve incremento en este periodo también en invierno, el incremento de las precipitaciones es de menor magnitud que el de los eventos de crecidas del río. Solamente el aumento de las precipitaciones no explica las variaciones en el régimen de crecidas del río.

Cuando se analiza el comportamiento del periodo en tres sub-periodos 1987-1996, 1997-2005 y 2006-2017, se encuentra que existen diferencias. En el primer periodo las correlaciones entre las precipitaciones y los niveles del río suceden el primer día y la correlación máxima el cuarto día. En el segundo sub-periodo las correlaciones suceden con una disminución en el retraso, la primera correlación significativa se presenta el mismo día de las precipitaciones y la máxima ocurrió el segundo día. En el tercer periodo se repite la situación anterior, pero con mayor magnitud en las correlaciones. Lo que indica que el agua de las precipitaciones ocurridas en la cuenca –en especial en la cuenca alta- presenta una tendencia a llegar más rápidamente a la cuenca baja. Esta disminución en el tiempo de respuesta del sistema cuenca, implica aumento en la cantidad de eventos de desborde del río, y en especial aumento de la magnitud del desborde (superior a 7 metros).

Esta serie de cambios en el régimen de desborde del canal principal del río en la cuenca baja, no son explicados únicamente por la variabilidad de las precipitaciones, se analizan entonces los cambios en el uso del suelo en la cuenca en el periodo. Se encuentra que en este periodo se registra un incremento en la intensificación en el uso del suelo, que sigue la tendencia nacional (Gazzano *et al.*, 2019), donde los usos más intensivos pasan de ocupar el 15.9% al 35.4%. Estas transformaciones en la cobertura vegetal de la cuenca, genera cambios en el régimen hidrológico de la cuenca en especial la relación infiltración - escurrimiento superficial del agua de precipitaciones y en menor magnitud evapotranspiración-acumulación del agua en el suelo (Viglizzo *et al.*, 2016; Alaoui *et al.*, 2018).

Se encontró que al menos dos factores influyen en el comportamiento hidrológico del Río San José, las precipitaciones y los usos del suelo. Esto genera un aumento en el número y magnitud de los desbordes del río en la cuenca baja, lo que genera un factor de riesgo para la población de la ciudad de San José de Mayo que reside en las planicies bajas de la ciudad, ya que deben evacuar sus viviendas con mayor frecuencia. El escenario de aumento de precipitaciones, previsto para la región (Díaz y Hurlbert, 2014), conjuntamente con el incremento de la intensificación agraria (Brazeiro *et al.*, 2020), genera una situación de aumento en la vulnerabilidad de la población urbana. Por tanto, es importante crear una estrategia territorial para actuar adecuadamente en los espacios urbanos inundables, teniendo en cuenta el funcionamiento de toda la cuenca.

Referencias

ACHKAR, M., DÍAZ, I., DOMÍNGUEZ, A., & PESCE, F. Uruguay: naturaleza, sociedad, economía: una visión desde la geografía. Montevideo: Ediciones de la Banda Oriental, 2016.

ACHKAR, M., CAYSSIALS, R., DOMÍNGUEZ, A., & PESCE, F. Hacia un Uruguay sustentable: gestión integrada de cuencas hidrográficas. Montevideo: REDES, Amigos de la Tierra Uruguay, 2004.

AGUAYO, M., AZÓCAR, G., & HENRÍQUEZ, C. Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2006, N° 36, p. 61-74. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022006000200004>

ALAOUI, A., ROGGER, M., PETH, S., & BLÖSCHL, G. Does soil compaction increase floods? A review. *Journal of hydrology*, 2018, Vol. 557, p. 631-642. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.052>

ALCÁNTARA-AYALA, I. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 2002, Vol. 47, Nº 2-4, p. 107-124. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00083-1)

ALISTE, E. El discurso del desarrollo y sus efectos ambientales en Chile: Prácticas espaciales y transformaciones territoriales en el área metropolitana de Concepción, 1950-2010. *Revista electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 2012, Vol. XVI, Nº. 418 (40). <https://doi.org/10.13140/2.1.2893.120>

ALISTE, E., ALMENDRAS, A., & CONTRERAS, M. La dinámica del territorio en la conurbación Concepción- Talcahuano: huellas urbanas ara una interpretación de las transformaciones ambientales durante la segunda mitad del siglo XX. *Revistas de Geografía Norte Grande*, 2012, Nº 52, p. 5-18. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022012000200001>

ALVARIÑO, S., BOCCO, A., TERRA, R., BIDEGAIN, M., & CRUZ, G. Caracterización de la variabilidad espacial y temporal de la evapotranspiración de referencia (ETO) en Uruguay. En: INIA (Ed.) Alternativas tecnológicas para el sector arrocerero en un escenario desafiante. Serie Técnica 246. Montevideo: INIA, 2018.

ARNETH, A., DENTON, F. AGUS, F., ELBEHRI, A., ERB, K. OSMAN ELASHA, B., RAHIMI, M., ROUNSEVELL, M., SPENCE, A., & VALENTINI, R. Framing and Context. En: SHUKLA, P.; SKEA, J.; CALVO BUENDIA, E.; MASSON-DELMOTTE, V.; PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D.; ZHAI, P.; SLADE, R.; CONNORS, S.; VAN DIEMEN, R.; FERRAT, M.; HAUGHEY, E.; LUZ, S.; NEOGI, S.; PATHAK, M.; PETZOLD, J.; PORTUGAL PEREIRA, J.; VYAS, P.; HUNTLEY, E.; KISSICK, K.; BELKACEMI, M.; MALLEY, J. (eds.) Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. In press. 2019.

BENAVIDES, IF, SOLARTE, ME., PABÓN V., ORDOÑEZ, A., BELTRÁN, E., ROSERO, S., & TORRES, C. The variation of infiltration rates and physical-chemical soil properties across a land cover and land use gradient in a Páramo of southwestern Colombia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, Vol. 73, Nº 4, p. 400-410. <https://doi.org/10.2489/jswc.73.4.400>

BERBERY, E., & BARROS, V. The hydrologic cycle of the La Plata basin in South America. *Journal of Hydrometeorology*, 2002, Vol. 3, Nº 6, p. 630-645. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2002\)003<0630:THCOTL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003<0630:THCOTL>2.0.CO;2)

BERNAL, F. Inundaciones: ¿Cambio climático? ¿O deforestación, más monocultivo de soja, más oligarquía (anarquía) agraria?, 2017. (Consulta: 04.12.2019) <http://www.iade.org.ar/system/files/inundaciones.pdf>

BIDEGAIN, M., PASTEN, M., NAGY, G., CORONEL, G., FERRER, J., & ARANA, I. Tendencias recientes de las precipitaciones e impactos asociados con ENSO en la cuenca del Río de la Plata. *Paraquaria Natural*, 2017, Vol. 5, Nº 2, p. 8-18.

- BIDEGAIN, M., CRISCI, C., DEL PUERTO, L., INDA, H., MAZZEO, N., TAKS, J., & TERRA, R. Clima de cambios: nuevos desafíos de adaptación en Uruguay (Vol 1. Variabilidad climática de importancia para el sector productivo). Montevideo: FAO, MGAP, 2012. (Consulta: 13.02.2020) <http://www.fao.org/docrep/field/009/as253s/as253s.pdf>
- BIRKMANN, J., BÖHM, H., BÜSCHER, D., FLEISCHHAUER, M., FROMMER, B., JANSSEN, G., OVERBECK, G., SCHANZE, J., SCHLIPF, S., STOCK, M., & VOLLMER, M. Planungs- und Steuerungsinstrumente zum Umgang mit dem Klimawandel. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, 2010.
- BRAZEIRO, A., ACHKAR, M., TORANZA, C., & BARTEZAGHI, L. Agricultural expansion in Uruguayan grasslands and priority áreas for vertebrate and woody plant conservation. *Ecology and Society*, 2020, Vol. 25, Nº 1: 15. <https://doi.org/10.5751/ES-11360-250115>
- CAMARASA BELMONTE, A., LÓPEZ, M., & GARCÍA, E. Cambios de uso del suelo, producción de escorrentía y pérdida de suelo. Sinergias y compensaciones en una rambla mediterránea (Barranc del Carraixet, 1956–2011). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 2018, Nº 78, p. 127-153. <https://doi.org/10.21138/bage.2714>
- CAMILLONI, I., & BARROS, V. The Parana river response to El Nino 1982–83 and 1997–98 events. *Journal of Hydrometeorology*, 2000, Vol. 1, Nº 5, p. 412-430. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2000\)001<0412:TPRRT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2000)001<0412:TPRRT>2.0.CO;2)
- CAORSI, M., CRUZ, G., TERRA, R., & ASTIGARRAGA, L. Variación de la precipitación y la ocurrencia de sequías en la cuenca lechera del SW del Uruguay en el período 1939–2011. *Agrociencia Uruguay*, 2018, Vol. 22, Nº 1, p. 116-123. <https://doi.org/10.31285/agro.22.1.12>
- CAORSI, M., CRUZ, G., TERRA, R., & ASIGARRAGA, L. Estudio de la variabilidad climática en la cuenca lechera del SW del Uruguay. Reunión binacional Uruguay- Argentina de Agrometeorología, XV Reunión Argentina del Agrometeorología, 2014, Piriápolis, Uruguay.
- CASTAÑO, J., BAETHGEN, W., GIMENEZ, A., MAGRIN, G., TRAVASSO, M., OLIVERA, L., ROCCA DA CUNHA, G., & CUNHA FERNANDES, J. Evolución del clima observado durante el período 1931–2000 en la región sureste de América del Sur, 2007. (Consulta: 24.02.2020) http://www.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/publicaciones/ambiente/se_a_s_2007.pdf
- CHAMORRO, A., & SARANDÓN, S. Análisis del impacto ambiental del cambio de secuencias de cultivo en el partido de Tres Arroyos (Buenos Aires, Argentina). *Revista de la Facultad de Agronomía*, La Plata, 2017, 116(1), p. 89-99.
- CONDE-ÁLVAREZ, C., & SALDAÑA-ZORRILLA, S. Cambio climático en América Latina y el Caribe: impactos, vulnerabilidad y adaptación. *Ambiente y desarrollo*, 2007, Vol. 23, Nº 2, p. 23-30.
- CONGEDO, L. Semi-automatic classification plugin documentation. *Release*, 2016, 4(0.1), 29.

CRUZ, G., BAETHGEN, W., BARTABURU, D., BIDEGAIN, M., GIMENEZ, A., METHOL, M., MORALES, H., PICASSO, V., PODESTÁ, G., TADDEI, R., TERRA, R., TISCORNIA, G., & VINOCUR, M. Thirty years of multilevel processes for adaptation of livestock production to droughts in Uruguay. *Weather, Climate, and Society*, 2018, Vol.10, Nº 1, p. 59-74. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-16-0133.1>

Díaz, J. Uso correcto de la correlación cruzada en Climatología: el caso de la presión atmosférica entre Taití y Darwin. *Terra Nueva Etapa*, 2014, Vol. 30, Nº 47, p. 79-102.

DÍAZ, H., & HURLBERT, M. Making Science Count: Climate Change and the Science/Practice Interface. En: LEAL FILHO, W.; ALVES, F.; CAEIRO, S.; AZEITEIRO, U. (eds.) *International Perspectives on Climate Change, Latin America and Beyond*. Basel: Springer, 2014, p.203-215. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04489-7_14

ESPINOSA, P., HORACIO, J., OLLERO, A., DE MEULDER, B., JAQUE, E., & MUÑOZ, M. When Urban Design Meets Fluvial Geomorphology: A Case Study in Chile. En: THORNBUSH, M.; ALLEN, C. (eds.) *Urban Geomorphology, Landforms and Processes in Cities*. Amsterdam: Elsevier. 2018, p. 149-174. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811951-8.00009-6>

FERRANDO, F. Sobre inundaciones y anegamientos. *Revista de urbanismo*, 2006, Nº 15, p. 25-42. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2006.5129>

FERREIRA, J., & DE SOUZA ROBAINA, L. Expansão urbana e o perigo de desastres por inundação em rio Grande/RS. *Geografia*, 2012, Vol. 37, Nº 3, p. 445-462.

FERRELLI, F., BRENDEL, A., ALIAGA, V., PICCOLO, M., & PERILLO, G. Climate regionalization and trends based on daily temperature and precipitation extremes in the south of the Pampas (Argentina). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 2019, Vol., 45, Nº 1, p. 393-416. <https://doi.org/10.18172/cig.3707>

FREITAS, G., DÍAZ, I., BESSONART, M., DA COSTA, E., & ACHKAR, M. An ecosystem-based composite spatial model for floodplain vulnerability assessment: a case study of Artigas, Uruguay. *GeoJournal*, 2019, p. 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10708-019-10120-3>

FRICH, P., ALEXANDER, L., DELLA-MARTA, P., GLEASON, B., HAYLOCK, M., TANK, A., & PETERSON, T. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate research*, 2002, Vol. 19, Nº 3, p. 193-212. <https://doi.org/10.3354/cr019193>

GAITÁN, J., NAVARRO, M., TENTI VUEGEN, L., PIZARRO, M., & CARFAGNO, P. Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina. Buenos Aires: Ediciones INTA, 2017.

GARCÍA, P., BADANO, N., MENÉNDEZ, A., BERT, F., GARCÍA, G., PODESTA, G., ROVERE, S., VERDIN, A., RAJAGOPLAN, B., & ARORA, P. Influencia de los cambios en el uso del suelo y la precipitación sobre la dinámica hídrica de una cuenca de llanura extensa. Caso de estudio: Cuenca del Río Salado, Buenos Aires, Argentina. *Ribagua*, 2018, Vol. 5, Nº 2, p. 92-106. <https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1495990>

GARCÍA PRÉCHAC, F., ERNST, O., ARBELETICHE, P., PÉREZ BIDEGAIN, M., PRITSCH, C., FERENCZI, A., & RIVAS, M. Intensificación agrícola: oportunidades y amenazas para un país productivo y natural. Montevideo: UdelaR, 2010.

GARCÍA, M., BELMONTE, A., & BELLÉS, J. Cambios en los usos del suelo y producción de escorrentía en ramblas mediterráneas: Carraixet y Poyo (1956-1998). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 2007, Nº 44, p. 69-94.

GAZZANO, I., ACHKAR, M., & DÍAZ, I. Agricultural Transformations in the Southern Cone of Latin America: Agricultural Intensification and Decrease of the Aboveground Net Primary Production, Uruguay's Case. *Sustainability*, 2019, Vol. 11, Nº 24, 7011. <https://doi.org/10.3390/su11247011>

HAGHNAZARI, F., SHAHGHOLI, H., & FEIZI, M. Factors affecting the infiltration of agricultural soils. *Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 2015, Vol. 6, Nº 5, p. 21-35.

HAMZA, M., & ANDERSON, W. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and tillage research*, 2005, Vol. 82, Nº 2, p. 121-145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>

HAYLOCK, M., PETERSON, T., ALVES, L., AMBRIZZI, T., ANUNCIAÇÃO, Y., BAEZ, J., BARROS, V., BERLATO, M., BIDEGAIN, M., CORONEL, G., CORRADI, V., GARCIA, V., GRIMM, A., KAROLY, D., MARENCO, J., MARINO, M., MONCUNILL, D., NECHET, D., QUINTARA, J., REBELLO, E., RUSTICUCCI, M., SANTOS, J., TREBEJO, I., & VINCENT, L. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960–2000 and links with sea surface temperature. *Journal of climate*, 2006, Vol. 19, Nº 8, p. 1490-1512. <https://doi.org/10.1175/JCLI3695.1>

HIRSCH, R., & SLACK, J. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, 1984, Vol. 20, Nº 6, p. 727-732. <https://doi.org/10.1029/WR020i006p00727>

HOLMAN, I., HOLLIS, J., BRAMLEY, M., & THOMPSON, T. The contribution of soil structural degradation to catchment flooding: a preliminary investigation of the 2000 floods in England and Wales. *Hydrology Earth System Sciences*, 2003, Vol. 7, p. 755–766. <https://doi.org/10.5194/hess-7-755-2003>

IORIS, A. Approaches and responses to climate change: challenges for the Pantanal and the upper Paraguay River basin. *Alternate Routes: A Journal of Critical Social Research*, 2014, Vol. 25, p. 119-125.

JAQUE, E., LARA, A., & MERINO, C. Fortaleciendo el uso de los instrumentos de planificación urbana, para la gestión de riesgos. Ciudad de Coronel, Región del Biobío. *Revista Invi*, 2017, Vol. 32, Nº 90, p. 107-124.

JHA, A., BLOCH, R., & LAMOND, J. Ciudades e Inundaciones: Guía para la Gestión Integrada del Riesgo de Inundaciones en Ciudades en el Siglo 21. Washington: World Bank, 2012.

JIA, G., SHEVLIAKOVA, E., ARTAXO, P., DE NOBLET-DUCOUDRÉ, N., HOUGHTON, R., HOUSE, J., KITAJIMA, K., LENNARD, C., POPP, A., SIRIN, A., SUKUMAR, R., & VERCHOT, L. Land-climate interactions. En: SHUKLA, P.; SKEA, J.; CALVO BUENDIA, E.; MASSON-DELMOTTE, V.; PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D.; ZHAI, P.; SLADE, R.; CONNORS, S.; VAN DIEMEN, R.; FERRAT, M.; HAUGHEY, E.; LUZ, S.; NEOGI, S.; PATHAK, M.; PETZOLD, J.; PORTUGAL PEREIRA, J.; VYAS, P.; HUNTLEY, E.; KISSICK, K.; BELKACEMI, M.; MALLEY, J. (eds.) *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. In press. 2019.

Kendall, M. *Rank correlation methods*. London: Charles Griffin, 1975.

KIM, S., LEE, S., KIM, D., & SONG, C. Stormwater inundation analysis in small and medium cities for the climate change using EPA-SWMM and HDM-2D. *Journal of Coastal Research*, 2018, Special Issue 85 - Proceedings of the 15th International Coastal Symposium, p. 991-995. <https://doi.org/10.2112/SI85-199.1>

LAL, M., SAU, B., PATIDAR, J., & PATIDAR, A. Climate change and groundwater: impact, adaptation and sustainable. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, 2018, Vol. 9, Nº 3, p. 408-415. <https://doi.org/10.23910/IJBSM/2018.9.3.3C0671b>

LAWRENCE, D., HURTT, G., ARNETH, A., BROVKIN, V., CALVIN, K., JONES, A., JONES, C., LAWRENCE, P., DE NOBLET, N., PONGRATY, J., SENEVIRATNE, S., & SHVLIAKOVA, E. The Land Use Model Intercomparison Project (LUMIP) contribution to CMIP6: rationale and experimental design. *Geoscientific Model Development*, 2016, Vol. 9, p. 2973-2998. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2973-2016>

LEGENDRE, P., & LEGENDRE, L. *Numerical ecology: developments in environmental modelling*. Elsevier, 1998, p. 63-75.

MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. *Guía de Siembra Directa*. Montevideo: MGAP, 2009.

MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. *Unidades de suelos Coneat*. Montevideo: MGAP, 1994.

MANN, H. Nonparametric tests against trend. *Econometrica. Journal of the Econometric Society*, 1945, Vol. 13, Nº 3, 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>

NAVARRETE, D., GALLOPÍN, G., BLANCO, M., DIAZ ZORITA, M., FERRARO, D., HERZER, H., LATERRA, P., MURMIS, M., PODESTÁ, G., RABINOVICH, J., SATORRE, E., TORRES, F., & VIGLIZZO, E. Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturization in the Argentine Pampas. *Environment, Development and Sustainability*, 2009, Vol. 11, Nº 3, p. 621-638. <https://doi.org/10.1007/s10668-007-9133-0>

NIGHTINGALE, A., ERIKSEN, S., TAYLOR, M., FORSYTH, T., PELLING, M., NEWSHAM, A., BOYD, E., BROWN, K., HARVEY, B., JONES, L., BEZNER, R., MEHTA, L., NAESS, L., OCKWELL, D., SCANNES,

I., TANNER, T., & WHITFIELD, S. Beyond Technical Fixes: climate solutions and the great derangement. *Climate and Development*, 2019, p. 1-10. <https://doi.org/10.1080/17565529.2019.1624495>

NOSETTO, M., PAEZ, R., BALLESTEROS, S., & JOBBÁGY, E. Higher water-table levels and flooding risk under grain vs. livestock production systems in the subhumid plains of the Pampas. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, Vol. 206, p. 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.009>

RODGERS, K. Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado. Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente, OEA, 1993. (Consulta: 08.02.2020) <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea65s/begin.htm>

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. Guía de prácticas climatológicas, 2011. (Consulta: 20.12.2019). http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/guide/documents/wmo_100_es.pdf

PERRACHÓN, J. Siembra directa en Uruguay; algunos mitos muy arraigados en el ámbito agropecuario. *Revista del Plan Agropecuario*, 2011, N° 139, p. 42-45.

PINTO, P., & PIÑEIRO, G. Cultivos de servicios, una alternativa para el manejo de malezas. II Congreso Argentino de Malezas, 2018, Rosario, Argentina.

PRECIOZZI, F., SPOTURNO, J., HEINZEN, W., ROSI, P., CAZAUX, S., & MORALES, E. Memoria explicativa de la carta geológica de San José a escala 1:100.000. Montevideo: DINAMIGE. 2004.

REDES. Impactos del cultivo de soja en Uruguay, cambios en el manejo de la tierra y en el uso de agroquímicos. Montevideo: Redes, 2011.

REINA, A., & ROSELLÓ, M. Relaciones entre los cambios en los usos del suelo y el incremento de los riesgos de inundabilidad y erosión: análisis diacrónico en la provincia de Málaga (1957–2007). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 2019, N° 81, 2740, p. 1–38. <https://doi.org/10.21138/bage.2740>

RICHARDS, J., & JIA, X. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Berlín: Springer, 2006.

ROLLÁN, AAC., & BACHMEIER, OA. Compactación y retención hídrica en Haplustoles de la provincia de Córdoba (Argentina) bajo siembra directa. *Agriscientia*, 2014, Vol. 31, N° 1, p. 1-10. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v31.n1.9835>

SANTELICES, A., & ROJAS J. Climate Change in Latin America: Inequality, Conflict, and Social Movements of Adaptation. *Latin American Perspectives*, 2016, Vol. 43, N° 4, p. 4-11. <https://doi.org/10.1177/0094582X16644916>

SARRICOLEA, P., MESEGUER RUIZ, O., & ROMERO-ARAVENA, H. Tendencias de la precipitación en el Norte Grande de Chile y su relación con las proyecciones de cambio climático. *Diálogo andino*, 2017, N° 54, p. 41-50. <https://doi.org/10.4067/S0719-26812017000300041>

SCHÖN, F., DOMÍNGUEZ, A., & ACHKAR, M. Distribución territorial de áreas urbanas en zonas de humedales en Uruguay. *Geo UERJ*, 2018, Nº 33. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2018.36322>

SISTEMA NACIONAL DE EMERGENCIAS. Base de Datos sobre eventos de emergencias. Montevideo: SINAE, 2017.

VALLEJOS, A., KEES, M., BONDIA, P., ECHEVERRÍA, N., SILENZI, J., ZAJAC, C., & DE LUCIA, M. Subsolado en siembra directa: efectos sobre parámetros físicos del suelo y el rendimiento de soja. *Ciencia del suelo*, 2014, Vol. 32, Nº 2, p. 291-300.

VIGLIONE, A., MERZ, B., VIET DUNG, N., PARAJKA, J., NESTER, T., & BLÖSCHL, G. Attribution of regional flood changes based on scaling fingerprints. *Water resources research*, 2016, 52, Nº 7, p. 5322-5340. <https://doi.org/10.1002/2016WRO19036>

VIGLIZZO, E., JOBBÁGY, E., RICARD, M., & PARUELO, J. Partition of some key regulating services in terrestrial ecosystems: meta-analysis and review. *Science of the Total Environment*, 2016, Vol. 562, p. 47-60. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.201>

WEISKOPF, S., RUBENSTEIN, M., CROZIER, L., GAICHAS, S., GRIFFIS, R., HALOFSKY, J., HYDE, K., MORELLI, T., MORISETTE, J., MUÑOZ, R., PERSHING, A., PETERSON, D., POUDEL, R., STAUDINGER, M., SUTTON-GRIER, A., THOMPSON, L., VOSE, J., WELTZIN, J., & POWYS WHYTE, K. Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of the Total Environment*, 2020, Vol. 733. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782>

XIAO, Y., YI, S., & TANG, Z. GIS-based multi-criteria analysis method for flood risk assessment under urbanization. 24th International Conference on Geoinformatics, 2016, (1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/GEOINFORMATICS.2016.7578963>

XU, D., LYON, S. MAO, J., DAI, H., & JARSJÖ, J. Impacts of multi-purpose reservoir construction, land-use change and climate change on runoff characteristics in the Poyang Lake basin, China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2020, Vol. 29. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100694>

ZHANG, X., ALEXANDER, L., HEGERL, G., JONES, P., TANK, A., PETERSON, T., TREWIN, B., & ZWIERS, F. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2011, Vol. 2, Nº 6, p. 851-870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>