

# LA INFLUENCIA CLIMÁTICA EN LOS RECURSOS HIDRICOS

Por J. B. MILLER\*

## Introducción

El caudal de un río varía según amplios márgenes temporales, lo que puede hacer que la gestión racional de los recursos hídricos de un país sea una empresa difícil. El informe, preparado por un grupo de agencias de las Naciones Unidas, incluyendo a la OMM, para su presentación en la Sesión Especial de la Asamblea General de las Naciones Unidas en 1997, "Evaluación detallada de los recursos de agua dulce del mundo", indica que incluso los países que sólo utilizan el 10 ó el 20% de sus recursos de agua dulce tienen problemas relacionados con ésta y que "se necesitan inversiones y esfuerzos significativos para aumentar el suministro y disminuir la demanda". Los recursos hídricos se miden en este informe por medio de la escurrentía media anual y el uso incluye tanto el dedicado al consumo, como por ejemplo para irrigación, donde el agua se evapora, como el no dedicado al consumo donde el agua es devuelta al sistema del río y puede eventualmente disponerse de ella, aunque por lo general con una calidad degradada. La variabilidad en la escurrentía del río es uno de los orígenes principales de los problemas de los recursos hídricos, dando lugar a unos niveles comparativamente muy bajos de utilización.

Las escalas temporales más importantes en la variabilidad son, por supuesto, las estacionales. En las zonas templadas, el caudal tiende a ser elevado durante el invierno y decrece en los meses de verano, principalmente a causa de la mayor evaporación, y a veces debido a la disminución de las lluvias. En las zonas tropicales, los caudales son elevados durante la estación húmeda y considerablemente más bajos en la estación seca. Los ingenieros responsables de los recursos hídricos son conscientes de esta

variación anual y pueden mantener el suministro durante el período de bajo caudal mediante la construcción de embalses. No obstante, existen variaciones de mayor período en los caudales, resultantes de las oscilaciones interanuales. Estos efectos son más importantes en las regiones áridas, donde la escurrentía media es ya bastante baja. Los ingenieros no han tenido tanto éxito al querer controlar estas variaciones de ciclos mayores, sobre todo porque los embalses no siempre son una solución al problema, debido a los altos niveles de almacenamiento necesarios.

Se ha descubierto que el fenómeno de El Niño controla las características de las configuraciones climáticas en amplios ciclos temporales (incluyendo las precipitaciones) en escalas de dos a cinco años. Este artículo analiza el efecto del fenómeno de El Niño sobre las escurrentías, esperando poder mejorar la comprensión de la variabilidad de la disponibilidad de los recursos hídricos en aproximadamente las mismas escalas temporales. Además, examina las escurrentías registradas en varios ríos de distintos continentes y las relaciona como una medida del efecto de El Niño.

## Datos

Los datos de escurrentía utilizados en este estudio fueron obtenidos de la base de datos de los registros de corrientes fluviales elaborada por el Profesor T. A. McMahon de la Universidad de Melbourne, Australia, para estudios hidrológicos mundiales. Consiste en 1 185 informes mensuales y anuales de volúmenes de escurrentía (en  $10^6 \text{ m}^3$ ) y en picos de descarga anual (en  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) procedentes de 87 países. Los registros son de diferente extensión, pero la mayoría acaban en el período 1970-1984 con fechas de comienzo variables, siendo la más antigua de 1807. (Para una descripción más detallada de la base de datos, véase Finlayson *et al.*, 1986). Como ya se mencionó anteriormente, la fuente

\* Antiguo funcionario a cargo del Sistema Hidrológico Operativo de Propósitos Múltiples, Departamento de Hidrología y Recursos Hídricos, OMM

más importante de variación de los caudales de los ríos es el ciclo estacional anual. Para eliminar esto, el presente estudio utilizó volúmenes anuales de escorrentía. En un principio, se planteó utilizar estaciones con registros de 50 años o más. Sin embargo, significaba que de esta manera algunos continentes quedarían virtualmente fuera del estudio, mientras que otros, con registros fluviales más extensos, tendrían una representación desproporcionada. El criterio de la extensión de los registros variaba según el continente, desde 30 años para Sudamérica a 60 años para Europa y América del Norte. Cuando se trazaron los mapas iniciales, se detectaron diversas lagunas, agregándose al estudio algunas estaciones con registros más cortos para rellenar esos espacios, llegándose a un total de 179 estaciones de 37 países. Se prestó especial atención a los registros más largos para incluir varios ciclos de la Oscilación Austral y para asegurar que la correlación calculada fuese precisa. La situación de las estaciones utilizadas está señalada en las Figuras 1 y 3 con pequeños signos de suma.

La ocurrencia o no del fenómeno de El Niño queda representada en el estudio por el Índice de Oscilación Austral (IOA), el cual se basa en las diferencias de la presión media mensual a nivel del mar entre Tahití y Darwin.

Los datos fueron obtenidos de la dirección Web del Australian Bureau of Meteorology<sup>1</sup> donde se encuentran datos desde enero del 1876 hasta la actualidad. Los valores tabulados son:

$$IOA = 10 * [AP(Tahiti) - AP(Darwin)] / DT$$

donde AP = anomalía de la presión mensual al nivel del mar y  
DT = desviación típica de las diferencias de presión para ese mes con respecto al período de referencia.

El período de referencia para el cálculo de las anomalías en la presión es el de los 60 años comprendidos entre 1933 y 1992. La serie publicada está completa, aunque ha sido necesario agregar varios valores, especialmente durante los primeros años. Esta serie está referida en la literatura como la Serie Troup-BOM IOA (Allan et al., 1996). Con esta definición, el fenómeno de El Niño ocurre para bajos valores del IOA. Una guía somera de la presencia de un fenómeno El Niño es que se den valores del SOI por debajo de -1.0 con una persistencia de 3 meses o más. Como los datos para la escorrentía se expresaron en volúmenes anuales, los valores del IOA se promediaron con respecto al año civil para poder calcular así las correlaciones de los valores anuales.

<sup>1</sup> (<http://www.bom.gov.au/climate/current/soihtm1.shtml>)

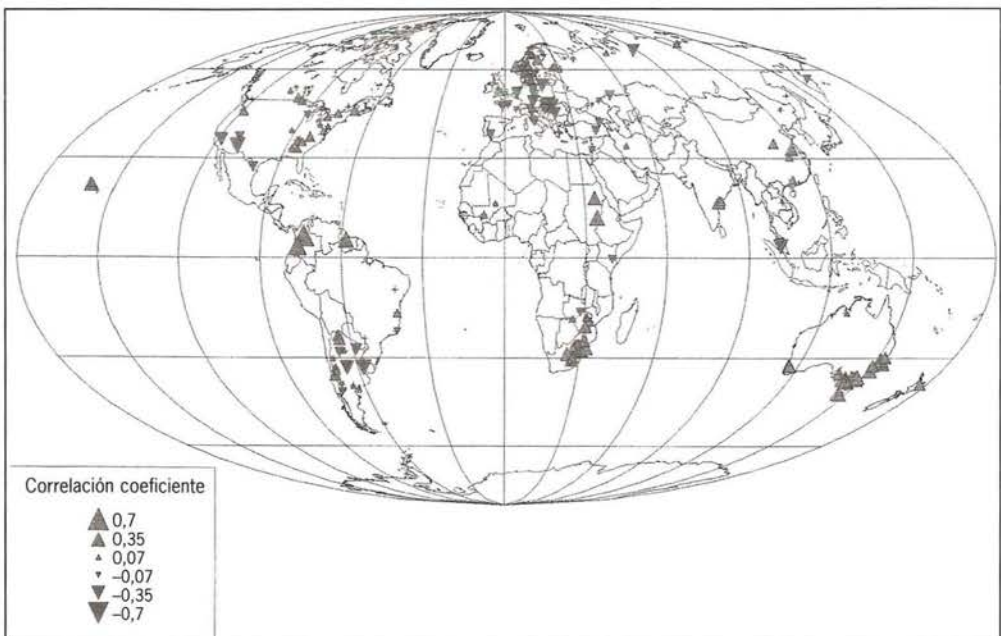


Figura 1 — Correlación entre el IOA y el volumen anual de escorrentía (retardo 0)



## Resultados

Se calcularon para diferentes retardos temporales (en años) las correlaciones entre los volúmenes de escorrentía anual y el IOA medio anual. Las correlaciones para un retardo 0 se muestran en el mapa de la Figura 1. El tamaño del triángulo que marca la posición de la estación muestra el valor de la correlación, representándose las correlaciones positivas mediante un triángulo que apunta hacia arriba y las negativas por otro que apunta hacia abajo. Una correlación positiva significa una baja escorrentía del río, es decir, una tendencia a la sequía, durante los períodos de El Niño. Las correlaciones con la escorrentía retrasada en un año con respecto al IOA dieron de alguna forma resultados similares, estando la mayoría de las correlaciones más cercanas a cero. En algunos casos las correlaciones (en valor absoluto) fueron considerablemente mayores y a menudo cambiaron de signo. Se observaron algunas correlaciones grandes (nuevamente en valor absoluto) durante largos períodos (de tres a seis años) pero éstas se dieron probablemente como consecuencia de la naturaleza cíclica de la Oscilación Austral.

Las mayores correlaciones se observan predominantemente en el norte de Sudamérica (Colombia y Guyana), Australia y en el sur de África. La correlación medida más elevada se observó en el río Magdalena, en Puerto Berrio, en Colombia y tiene el valor de 0,684. Esto supone que un 47% de la variación del volumen anual de escorrentía para este río se describe (en un sentido estadístico) por las variaciones del IOA. La Figura 2 muestra la media anual del IOA junto con el registro anual de la escorrentía del río Magdalena y la similitud en la configuración de la variación de los dos registros puede verse fácilmente. Para unos 24 registros, el IOA describe más del 10% de la variación de la escorrentía anual. Las configuraciones regionales también son interesantes, aunque la baja densidad de datos en algunas regiones nos obliga a tener cierta precaución a la hora de interpretarlas. El continente australiano tiene predominantemente correlaciones positivas, la gran mayoría de las cuales son bastante grandes, particularmente en el sudeste, donde la cobertura de datos es buena, lo que no es de sorprender, considerando la fuente de los datos. El suroeste de los EE.UU. tiene correlaciones negativas, es decir, grandes

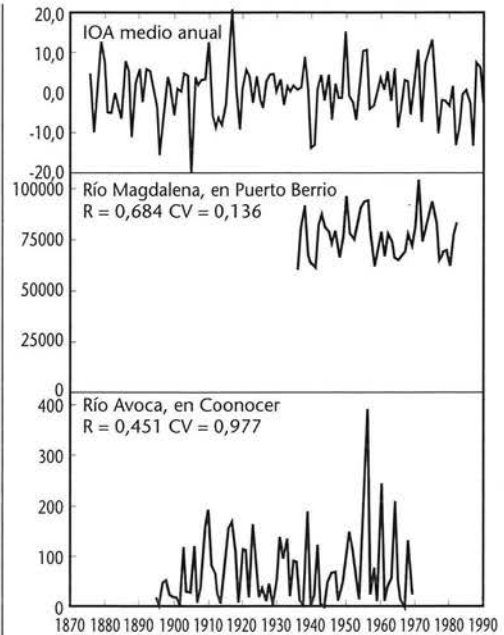


Figura 2 — Índice de Oscilación Austral y volumen de escorrentía anual para los ríos seleccionados

caudales durante los períodos de El Niño, algunas de las cuales también son bastante importantes. El resto de Norte América tiene correlaciones positivas, aunque ninguna de ellas es muy elevada. África tiene mayoritariamente correlaciones positivas, con grandes valores en la cuenca de Nilo y en el sur. En Sudamérica, la configuración está más mezclada: las tres estaciones en el norte tienen grandes correlaciones positivas (0,68, 0,55 y 0,46), mientras que bastante más al sur se encuentran tanto valores negativos como positivos. Hay algunas tendencias en las estaciones de Los Andes a presentar correlaciones positivas, con valores negativos más al este. Todas las estaciones tratadas están situadas al este de Los Andes, debido a que la base de datos no contiene valores ni de Perú ni de Chile. La configuración en Europa resulta interesante: una banda de correlaciones negativas moderada se extiende desde el Reino Unido en dirección este hacia la Federación Rusa e incluso hasta Kazajastán, contrastando con las pequeñas correlaciones positivas de los países nórdicos. En Asia se encuentran correlaciones negativas en el oeste adyacente a Europa, mientras que los escasos registros disponibles de la India y de China muestran correlaciones positivas.

## Discusión

Se han calculado muchas correlaciones y es posible que algunas correlaciones importantes hayan surgido por pura casualidad. Por ejemplo, aceptando la hipótesis nula, o sea que no hay correlación entre la escorrentía y el IOA, un par de registros de 62 años (el tamaño medio de los registros para este estudio) daría un coeficiente de correlación mayor que 0,25 (o menor que  $-0,25$ ) para el 5% de las pruebas, sólo por azar. Como todos los registros tienen distinto tamaño, la probabilidad de que cada correlación ocurra sólo por casualidad basándose en la hipótesis nula de correlación cero, fue calculada utilizando la estadística  $z$  de Fisher, que transforma el coeficiente de correlación en una variable normal o gaussiana. Para las correlaciones de retardo 0, unas 46 de ellas (el 26%) tenían una probabilidad de ocurrir de 0,05 o menos, 21 de ellas (el 12%) estaban por debajo de 0,01 y 10 de ellas (el 6%) estaban por debajo de 0,001. De aquí que haya muchas más correlaciones importantes que las surgidas por azar y que las correlaciones encontradas puedan tomarse como estadísticamente significativas. Las correlaciones de un retardo de un año mostraron un 11%, 3% y 2% respectivamente de los registros con correlaciones diferentes de cero en estos tres niveles, por lo que estas correlaciones también se pueden tomar como estadísticamente

significativas y no sólo debidas a la casualidad. Además, las distintas configuraciones regionales de correlaciones descritas anteriormente refuerzan la idea de que las correlaciones son reales y no se deben solamente al mero azar.

Una vez establecida la importancia estadística de las correlaciones, surge la cuestión de si resultan hidrológicamente importantes y útiles. Si la variación de escorrentía año tras año es pequeña, entonces ni siquiera las altas correlaciones nos proporcionarían alguna información adicional acerca de las escorrentías anuales. Por otra parte, si la variación de un año a otro es grande, el IOA podría proporcionar una información muy valiosa para la predicción de la disponibilidad de recursos hídricos para el año siguiente y así sucesivamente. El coeficiente de variación (CV), la desviación típica del volumen anual de escorrentía dividida por la media, proporciona un índice muy útil de la variabilidad de los caudales, y fue calculado para cada serie. El coeficiente de variación cambia considerablemente a lo largo del mundo, donde los valores más altos tienden a aparecer en los países más áridos. El coeficiente de variación medio en este estudio fue 0,41, y los registros individuales variaron de 0,07 a 2,20. Los países con los CV más altos fueron Sudáfrica (una media de 0,82), la República Islámica de Irán (0,82), Zambia

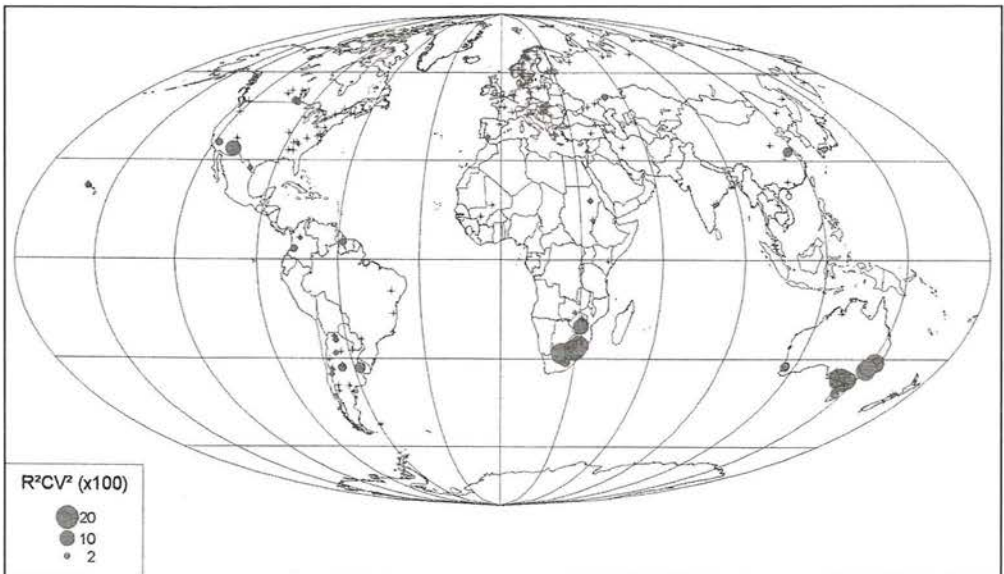


Figura 3 —  $R^2CV^2$ : un índice de la utilidad de las predicciones basadas en el Índice de Oscilación Austral



(0,74) y Australia (0,69). La amplia variación de los caudales anuales en estos países, hará que las predicciones basadas en el IOA sean útiles. Ya se ha señalado que Sudáfrica y Australia tienen altas correlaciones, por lo que parece existir una posibilidad real de hacer predicciones útiles en esas regiones. Además, como la posible utilidad de predicciones basadas en el IOA requiere correlaciones (R) altas, y un alto valor de CV, se calculó un índice  $R^2CV^2$  que combina a estos dos factores. Se ha utilizado  $R^2$  porque representa la proporción anual de escorrentía que sería explicada por una regresión lineal con el IOA, así que  $R^2CV^2$  tiene una interpretación estadística muy útil como la varianza de la escorrentía anual explicada por la correlación con el IOA, hecha adimensional al dividirla por el cuadrado de la media. Este índice podría denominarse el coeficiente de la variación explicada.

Este coeficiente está representado en la Figura 3 y, como era de esperar, Sudáfrica y Australia muestran los valores más altos, pero otras agrupaciones de valores altos se encuentran al sudoeste de los EE.UU., Argentina, Uruguay y Europa central. El río Magdalena, el que tiene la correlación más alta, posee un índice muy bajo, debido a que tiene un CV de poco valor, 0,14. El valor más alto para este índice se encuentra en el río Avoca en el sudeste de Australia y el registro de escorrentía para este río también se muestra en la Figura 2. No hay que sorprenderse si los hidrólogos australianos usan el IOA para hacer predicciones de las escorrentías (p.e. Allan et al. (1996) y Chiew et al. (1998)).

### Conclusiones

La escorrentía anual para algunos ríos en diferentes partes del mundo, ha mostrado tener una

correlación significativa con el IOA y, en algunos casos, la variación de la escorrentía año a año es tan grande que podría ser útil explotar esta correlación para predecir futuras escorrentías. Este estudio ha analizado crudamente el efecto de El Niño en los recursos hídricos, sugiriendo que, en las regiones indicadas, un análisis apropiado de las series temporales de la relación entre el IOA y la escorrentía de los ríos puede proporcionarnos predicciones fiables de las futuras corrientes de los ríos. La correlación de retardo cero utilizada aquí no permite predicciones, pero se podrían desarrollar modelos más detallados de series temporales, de forma que se relacionaran las escorrentías mensuales, con los valores del Índice de Oscilación Austral (IOA) de los últimos meses anteriores.

### Referencias

- ALLAN, R. J., G. S. BEARD, A. CLOSE, A. L. HERCZEG, P. D. JONES y H. J. SIMPSON, 1996: *Mean sea level pressure indices of the El Niño/Southern Oscillation: Relevance to stream discharge in south-eastern Australia* (Índices de El Niño/Oscilación Austral basados en la presión media al nivel del mar: importancia en los caudales del sureste de Australia). CSIRO, Division of Water Resources, Divisional Report 96/1.
- CHIEW, F. H. S., T. A. McMAHON, T. A. DRACUP y T. PIECHOTA, 1994: *El Niño/Southern Oscillation and streamflow patterns in South East Australia* (El fenómeno de El Niño/Oscilación Austral y las configuraciones del flujo de las corrientes en el sureste de Australia). *Australian Civil Engineering Transactions*, CE36, 4.
- FINLAYSON, B. L., T. A. McMAHON, R. SRIKANTHAN y A. HAINES, 1986: *World Hydrology: a new data base for comparative analysis. Proceedings of the Hydrology and Water Resources Symposium* (La hidrología en el mundo: nueva base de datos para el análisis comparativo. Actas del Simposio sobre Hidrología y Recursos Hídricos). Institution of Engineers, Australia, National Conference Publication 86/13, 288-296. □

## METNET EUROPA – PROYECTO METEOROLÓGICO ESCOLAR, 1998

Por John HARRIS<sup>1</sup>

MetNet Europa es un proyecto de colaboración entre escuelas sobre el tiempo atmosférico,

<sup>1</sup> Jefe del Departamento de Geografía, Radley College, Abingdon, Reino Unido

patrocinado por la Real Sociedad Meteorológica del Reino Unido, utilizando la red de Internet para estudios meteorológicos e intercambio de información a través de correo electrónico. El proyecto fue llevado a cabo