



DATOS E INDICADORES PARA DETECTAR Y ATRIBUIR EVENTOS AL CAMBIO CLIMÁTICO: LOS REGISTROS HISTÓRICOS DEL CLIMA Y SU PROBLEMÁTICA

Manola Brunet India^[1]

En este ensayo se exploran y analizan los datos e indicadores requeridos para detectar y atribuir eventos al cambio climático, incidiendo especialmente en la disponibilidad, accesibilidad y problemática de los registros climáticos de largo recorrido, los cuales son una fuente de información básica e imprescindible en los que, en buena medida, descansan los estudios de detección y atribución de causas del cambio climático en la actualidad. Asimismo, se define el estado de la cuestión, interés y finalidades de los estudios de detección y atribución de causas del cambio climático y se discuten los datos e indicadores requeridos para la realización de dichos estudios. Se plantean los problemas de disponibilidad y calidad de la información de base que posibilita los estudios de detección y atribución.

Palabras clave: cambio climático, clima, series de tiempo de datos climáticos, indicadores climáticos.

The data and indicators required to detect events to the climatic change are explored and discussed in this essay, making especially emphasis in the availability, accessibility and problems of the long-time climatic registers, which are a fundamental and indispensable source of information for current studies of detection and attribution of causes of the climatic change. Besides, the interest, purposes and characteristics of the studies of detection and attribution of causes of the climatic change are defined, and the data and indicators required for the execution of such studies are discussed. The problems of availability and quality of the information that enable the studies of detection and attribution are also indicated.

Key words: climate change, climate, climate time series, climate indicators.

[1] Doctora en Geografía e Historia; profesora en la Universidad Rovira i Virgili de Tarragona, España y co-directora del Open Programme Area Group de la Comisión de Climatología de la Organización Meteorológica Mundial donde conduce la Iniciativa MEDiterranean Data REscue; colabora con el Global Climate Observing System (GCOS) Atmosphere Observation Panel for Climate (AOPC) Surface Pressure Working Group (manola.brunet@urv.cat).

Estudios de detección y atribución de causas del cambio climático

En la comunidad científica existe una creciente preocupación acerca de la alta probabilidad que el clima, tanto en su comportamiento medio como extremo, esté cambiando como resultado del forzamiento antrópico asociado al incremento de gases efecto invernadero (GEI), los cuales perturban el balance de radiación y la disponibilidad de calor del sistema climático global. No obstante, la variabilidad natural del clima enmascara la huella de la influencia humana y complica la detección y atribución de causas del cambio climático; por ejemplo: la ocurrencia de extremos climáticos, como la inusual ola de calor acaecida en Europa durante el verano del 2003. Este evento individual no puede ser directa y simplemente atribuido al forzamiento antropogénico si no se demuestra que el mismo no pudiera haber ocurrido de forma natural.

Como es sabido, la detección se refiere a la identificación de cualquier cambio (i.e. una tendencia en una serie de temperaturas, un acontecimiento meteorológico extremo) presente en un registro climático, el cual es estadísticamente distinguible de cualquier otra ocurrencia previa observada en esa misma serie temporal durante periodos comparables. Además, la detección y atribución de causas involucra, también, la valoración de los cambios observados en relación con los que son esperables que ocurrieran en respuesta a cualquier forzamiento climático externo.

De tal manera que, la detección de cambios en los extremos climáticos requiere demostrar que se han verificado transformaciones estadísticamente significativas en las propiedades de los extremos climáticos o en el estado medio de cualquier variable climática durante el periodo analizado; mientras que, la atribución relaciona esos cambios detectados a las variaciones en los mecanismos de forzamiento climático, como: los GEI, la radiación solar o el forzamiento volcánico (Gutowski *et al.* 2008). Por ello, la atribución constituye un avance para identificar las causas físicas subyacentes en los cambios detectados en los extremos climáticos o en el estado medio

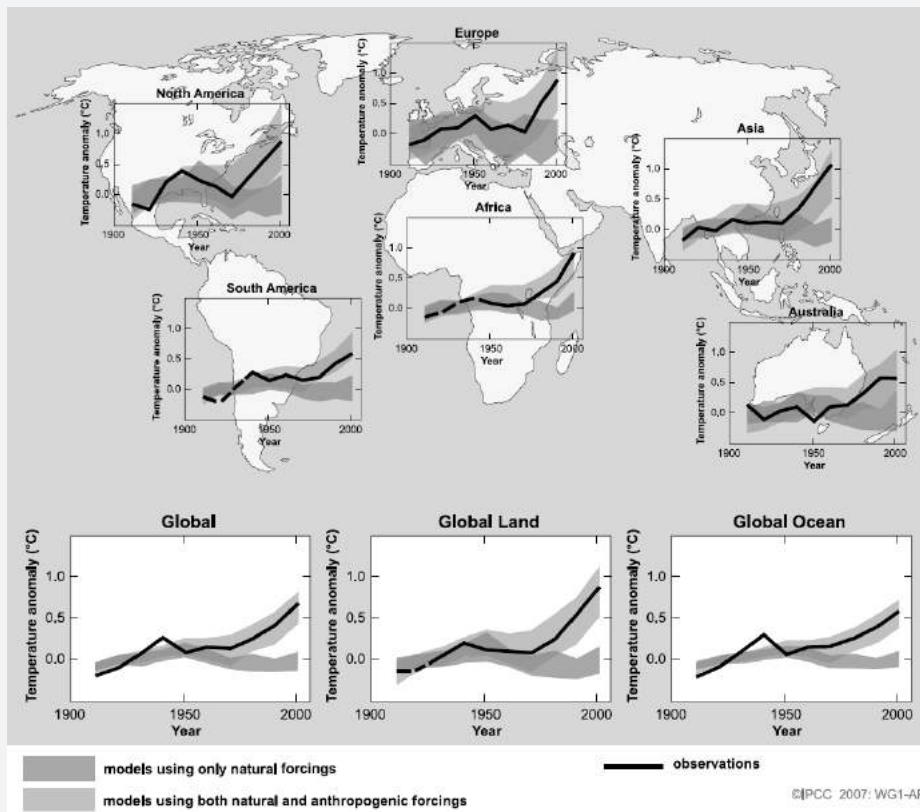
del clima. Además, la atribución de causas siempre compara cuantitativamente las simulaciones de modelos climáticos con las observaciones para contrastar los cambios esperables debidos al conocimiento físico actual integrado en los modelos con aquellos que han sido observados. Esto posibilita, también, una evaluación de las habilidades técnicas y resultados de los modelos climáticos y ayuda a constreñir las proyecciones del cambio futuro realizadas con dichos modelos. Por ello, los estudios de detección y atribución constituyen el proceso de comprobación de si un cambio observado es probable que se haya producido de forma natural (sin forzamiento antrópico) o expresado de otra forma: un cambio observado es detectado en los registros de una variable climática si su probabilidad de ocurrencia de forma natural o sin forzamiento antrópico es pequeña. En la figura 1 se compara la evolución térmica global y continental observada en los últimos ~150 años con las simuladas por los modelos climáticos forzados sólo con factores naturales y con éstos más el forzamiento de los GEI, evidenciando que el calentamiento observado a escala global desde finales de la década de los 70 no puede explicarse si no se añaden los factores de forzamiento antrópicos, según el último informe del Grupo Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (2007).

Como señala el informe del Programa de Ciencia del Cambio Climático de Estados Unidos de América (CCSP) (2008), las evaluaciones realizadas a escala global usando técnicas de detección espacio-temporales han identificado robustamente la influencia del forzamiento antrópico en el cambio observado de las temperaturas globales durante el siglo XX, en la humedad atmosférica (Willett *et al.* 2007) o en la precipitación global (Zhang *et al.* 2007). También, a escalas menores que la global (continentales) se han realizado estudios para detectar la influencia humana sobre el cambio observado de la temperatura del aire en Norteamérica, tanto para el conjunto del siglo XX (Stott, 2003) como para los últimos 50 años del pasado siglo (Zwiers and Zhang, 2003; Zhang *et al.* 2006), evidenciando que una parte substancial del calentamiento ha podido ser atribuido a la influencia humana (Hegerl *et al.* 2007).

Por otro lado, un simple razonamiento estadístico indica que cambios substanciales en la frecuencia, intensidad y/o duración de los extremos climáticos

Figura 1

Comparación entre la evolución global y continental de las temperaturas del aire observadas y simuladas por un modelo general del clima, sólo ante el forzamiento natural y añadiendo el forzamiento antrópico



Fuente: IPCC (2007).

pueden ser el resultado de una relativamente pequeña deriva en el promedio de la distribución estadística de las temperaturas, la precipitación o cualquier otra variable climática, por lo que cambios esperables, por ejemplo en las temperaturas, están en gran medida relacionadas, aunque no enteramente, a cambios en las temperaturas medias estacionales (Mearns *et al.* 1984; Katz and Brown, 1992).

Sólo en fecha reciente se han empezado a aplicar, de manera formal, estudios de atribución de causas en la ocurrencia de acontecimientos meteorológicos extremos también a la escala continental, como el observado incremento en los acontecimientos de precipitaciones de alta intensidad. Éstos han sido relacionados con el aumento en el contenido de vapor de agua en la atmósfera, el cual a su vez ha sido atribuido al calentamiento inducido antrópicamente (CCSP, 2008). Otros estudios

recientes de detección y atribución han sugerido que los cambios en los extremos térmicos deberían ser tan detectables como los cambios en el estado medio del clima térmico y que las alteraciones en los acontecimientos pluviométricos extremos serían aún más detectables que su cambio medio (Hegerl *et al.* 2004).

Una mejorada detección y atribución del cambio climático permitirá determinar hasta qué punto el forzamiento antrópico ha aumentado el riesgo en la ocurrencia de acontecimientos extremos individuales al establecer, para un mismo periodo de análisis climático y un predefinido nivel de confianza, la posibilidad de que ese acontecimiento hubiera podido producirse en ausencia del efecto humano (Allen, 2003). En este sentido, la influencia antrópica ha incrementado el riesgo de que un fenómeno extremo, como la mencionada ola de calor del

verano del 2003 en Europa, se haya aumentado por un factor de dos cuando se compara con el clima que habría existido en el caso de que sólo los factores naturales hubieran estado forzando el clima desde la década de los 90 (Stott *et al.* 2004).

Datos e indicadores requeridos para la mejoría de los estudios de detección y atribución de causas al cambio climático antrópico

Se ha puesto de manifiesto en la sección anterior que, para poder realizar estudios robustos de detección y atribución de causas del cambio climático, un requerimiento básico es disponer de series de tiempo observadas de las variables climáticas sobre las cuales se puedan examinar el carácter estadísticamente inusual de acontecimientos meteorológicos extremos y de cambios en el estado medio de la variable a explorar. Por ello, contar con datos instrumentales de largo recorrido y alta calidad constituye una necesidad básica y previa sobre los que se puedan basar dichos estudios de detección y atribución, ya que sin éstos no se pueden llevar a cabo ni esos análisis, ni otros muchos, en especial aquellos que exploran la variabilidad y cambio climático o los impactos derivados del clima actual forzado por las actividades humanas.

La sistemática vigilancia instrumental de la atmósfera desde la superficie terrestre ha producido las medidas observadas de las distintas variables meteorológicas, datos que han configurado las series de tiempo de los diferentes puntos de observación y variables climáticas registradas.

Estos registros históricos de variables o elementos climáticos (e.g. series de temperatura del aire, precipitación, presión, humedad atmosférica, etc.) constituyen —en caso de estar disponibles, accesibles y ser de calidad garantizada— la información de base más fiable en la que se puedan fundamentar los estudios de detección y atribución. No obstante, el registro instrumental del clima sólo permitiría documentar la evolución climática de los últimos ~200 años para algunas partes del planeta en los que la vigilancia instrumental es más antigua (e.g. Europa) o de los últimos ~150 años para la mayor parte del globo. Esta relativamente breve ventana temporal, comparada con la historia climática de nuestro planeta, podría ser insuficiente para evaluar la excepcionalidad de acontecimientos climáticos, en especial de aquéllos forzados por factores que actúan a escalas de tiempo mayores de las interdecadales.

Por ello, otro tipo de información indirecta de las condiciones climáticas del pasado, como las que ofertan los testigos *aproximados* del clima (e.g. anillos de crecimiento de los árboles, testigos de hielo, documentación histórica, corales, etc.) permiten extender más atrás en el tiempo el registro climático, cubriendo una fracción temporal muy variable dependiente del tipo de *proxy* utilizado. De este modo, contar con registros instrumentales de alta calidad y, además, con series de tiempo de testigos indirectos del clima, pese a las distintas características y resolución temporal que presentan, garantizarán la realización de estudios de detección y atribución de eventos para más largas ventanas temporales, como el análisis de Lutterbacher *et al.* (2004) sobre la variabilidad y tendencias de los extremos térmicos en Europa desde 1500 al presente.

No obstante que la información instrumental es la que actualmente se requiere más para fundamentar los estudios de detección y atribución, ésta se encuentra constituida por las series temporales más largas y fiables de las distintas variables climáticas, tanto en base mensual, para inspeccionar cambios singulares en la evolución del estado medio del clima, como a escala diaria, para evaluar cambios en los extremos climáticos y explorar su carácter excepcional. Por ello, la disponibilidad y accesibilidad a datos o registros climáticos de alta calidad es vital para sustentar más robustamente los estudios de detección y atribución, ya que las series de tiempo del clima posibilitan explorar la excepcionalidad de uno u otro acontecimiento climático en el contexto de la variabilidad temporal que las series de tiempo muestran.

Además, a partir de los datos históricos del clima, pueden derivarse otros indicadores de utilidad en los estudios de detección y atribución; por ejemplo: de la utilización de datos diarios de alta calidad y homogeneidad probada, el Grupo de Expertos sobre Detección e Índices del Cambio Climático (ETCCDI, por sus siglas en inglés) —de la World Meteorological Organization (WMO), Commission for Climatology (CCI)/World Climate Research Programme (WCRP), Project on Climate Variability and Predictability (CLIVAR)/junto al WMO-Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology (JCOMM)— ha definido y formulado

un conjunto de indicadores climáticos extremos^[2] que se han aplicado para detectar el cambio en los extremos climáticos a escalas regionales (e.g. Aguilar *et al.* 2005; Peterson *et al.* 2008) y global (e.g. Alexander *et al.* 2006).

Los indicadores formulados por el ETCCDI tienen como virtudes el ser fáciles de calcular y actualizar, de interés y validez a escala global, regional y local; son sencillos de entender y comparar, al mismo tiempo que tienen un claro significado físico; además, presentan un alto ratio señal/ruido que les hace especialmente valiosos para la detección del cambio climático.

Por otra parte, la probabilidad de detección de tendencias en acontecimientos extremos depende de sus periodos de retorno y de la longitud de las series observacionales y como la estimación de tendencias para un conjunto finito y pequeño de ocurrencias —como lo son por definición los acontecimientos extremos— suele no alcanzar la robustez estadística requerida, el ETCCDI ha definido y usado índices o indicadores climáticos basados en su ocurrencia anual.

Los 27 índices clave desarrollados por este grupo internacional de expertos^[3] pueden clasificarse en cinco categorías: los índices basados en percentiles (umbrales relativos), índices absolutos, indicadores de umbral absoluto, indicadores de duración y otros índices (Alexander *et al.* 2006).

Los basados en la distribución percentil de los datos y que expresan la ocurrencia de valores de las variables meteorológicas que exceden un determinado percentil (e.g. precipitación diaria > percentiles 90, 95 ó 99; temperaturas máximas y mínimas diarias > percentiles 90, 95 ó 98 o < percentiles 10, 5 ó 2), los cuales recogen acontecimientos extremos que tienen una baja probabilidad de ocurrencia, son los que presentan un alto grado de detectabilidad y comparabilidad entre distintas localidades y regiones del planeta, al estar basados en umbrales fijos, aunque relativos a la distribución estadística de los datos y, por lo tanto, su uso en estudios de detección es más generalizable a distintas escalas espaciales.

No obstante, los estudios de detección y atribución de causas a escalas espaciales más pequeñas que la global o continental se hallan limitados actualmente

por la disponibilidad y accesibilidad a datos climáticos de calidad y homogeneidad demostrada. Un conjunto diverso de causas, hacen que, desafortunadamente, la información instrumental disponible —en especial a escalas regionales, subregionales y locales— no presente ni la calidad requerida ni sean suficientes como para apoyar los estudios de detección y atribución.

Además, problemas de interoperabilidad entre redes, los distintos formatos de los datos digitales y algunas restricciones al libre uso de la información climática también dificultan el acceso a la información disponible, lo que constriñe nuestra capacidad para comprender mejor la variabilidad climática. Los problemas con los registros históricos del clima se evalúan en la siguiente sección.

Problemas con los datos históricos del clima: una calidad y disponibilidad aún limitada

Pese a que la atmósfera del globo terráqueo ha sido regular y concienzudamente monitoreada por las redes y observatorios meteorológicos y se ha producido una enorme cantidad de información climática a distintas escalas temporales (de la horaria/diaria a la mensual/anual), desafortunadamente sólo una pequeña fracción de los datos observados se hallan disponibles en formato utilizable (digital) para la investigación, son accesibles y presentan la calidad suficiente para poder ser empleados con confianza en los estudios de detección y atribución a escalas menores que la global.

En efecto, todavía se dispone de menos datos de los que se requieren y, además, éstos no siempre presentan la calidad necesaria para basar más robustamente en ellos cualquier estudio climático, en especial los relacionados con la del análisis de la variabilidad y cambio climático.

Pese a los esfuerzos realizados en las últimas décadas por parte de organismos internacionales (e.g. WMO, Global Climate Observing System:GCOS, Global Earth Observation System of Systems:GEOSS), instituciones de investigación y observación (e.g. universidades y centros de investigación, servicios meteorológicos nacionales) o proyectos internacionales (e.g. the WMO MEditerranean DAta REscue Initiative – MEDARE^[4], the Atmospheric Reconstructions over the Earth – ACRE^[5], International Environmental Data

[2] <http://www.clivar.org/organization/etccdi/etccdi.php>

[3] http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/list_27_indices.html

[4] <http://www.omm.urv.cat/MEDARE/index.html>

[5] <http://www.met-acre.org/>

Rescue Organisation – IEDRO^[6]) en el campo del rescate y desarrollo de bases de datos climáticos de alta calidad, todavía se halla demasiado restringida la disponibilidad y accesibilidad a los mismos.

Una gran fracción de las observaciones meteorológicas se hallan sólo disponibles en formatos frágiles y perecederos (e.g. papel, microfichas, imágenes, soportes magnéticos obsoletos) y su localización está dispersa en diferentes tipos de fuentes y organismos (archivos, bibliotecas, centros de documentación, entre otros, tanto nacionales como internacionales). Pero, además, no sólo la información disponible y accesible es mucho menor que la que se requiere, sino que también una importante fracción de la existente carece de la calidad necesaria para su utilización en cualquier estudio o aplicación climática.

Por ello, todavía es vital fomentar las actividades de localización, recuperación y digitalización de las observaciones originales; en definitiva, el proceso de rescate de datos, el cual conlleva un conjunto diverso de técnicas y procedimientos a seguir para su eficiente volcado al formato digital.^[7]

También, las observaciones meteorológicas originales digitalizadas están sujetas a un diverso número de errores que han podido introducirse a lo largo del proceso de observación, transcripción a los cuadernos meteorológicos y transferencia a los archivos centrales de la red. Ello puede reducir, marcadamente, la calidad del dato observado/medido cuando éste es guardado en los archivos de una red meteorológica, por lo que los servicios centrales validan los datos recibidos desde los observatorios previo a su almacenamiento. No obstante, algunos errores pueden ser introducidos y amplificados a través de toda la cadena de transmisión de datos y de transferencia de los mismos a los usuarios finales. Debido a esto, aún se requiere comprobar que los valores individuales que forman una serie temporal de cualquier variable climática están libres, en lo posible, de cualquier tipo de error más allá de los controles establecidos por los servicios meteorológicos centrales.

Se ha desarrollado un conjunto amplio de pruebas para controlar la calidad de los registros individuales, sean éstos datos diarios, horarios o mensuales; entre otras, se encuentran las sugeridas en documentos y notas técnicas que, regularmente, la WMO publica como recomendaciones que se deben seguir por los

servicios meteorológicos de sus estados miembros o por cualquier científico trabajando en el campo del desarrollo de bases de datos de alta calidad (e.g. Aguilar *et al.* 2003).

Las pruebas diseñadas para controlar la calidad de los datos —es decir, para identificar aquellos valores potencialmente erróneos existentes en una serie temporal— tienen la finalidad de identificar y etiquetar como sospechosos los datos que no superan las pruebas de calidad a las que son sometidos, los cuales quedan etiquetados como valores dudosos y serán comparados, posteriormente, con la fuente original y el juicio experto para ser validados como valores creíbles o rechazados, quedando fuera del conjunto de datos.

Entre otros tipos de control de calidad^[8] a las que son sometidos los valores individuales que forman una serie temporal han sido aconsejados los siguientes:

- Verificación de grandes errores: valores aberrantes (e.g. precipitación negativa, temperaturas imposibles, etc.), consistencia con las fechas del calendario, derivas en comas y cadenas de datos consecutivos idénticos, entre otros.
- Pruebas de tolerancia: identificación de valores considerados *outliers* o valores extremos que quedan fuera del rango de variabilidad esperable para cada tipo de clima y que exceden unos límites climáticos inferiores y superiores previamente establecidos.
- Pruebas de consistencia interna: inspección de la coherencia entre los valores que adquiere el dato examinado y los valores que tienen otras variables relacionadas (e.g. temperatura máxima \leq temperatura mínima, día de lluvia sin nubosidad, temperatura del termómetro de bulbo seco \leq temperatura del termómetro de bulbo húmedo).
- Pruebas de coherencia temporal: examen de la consistencia entre valores consecutivos observados en cualquier intervalo que superen la cantidad de cambio esperable entre una observación y la siguiente (e.g. temperaturas diarias entre una observación y la siguiente superando 15° C).
- Pruebas de coherencia espacial: comparación de los valores observados de cualquier variable en una estación con los registrados en un grupo de estaciones vecinas y climáticamente relacionadas para establecer si dichos valores son consistentes espacialmente.

[6] <http://www.iedro.com/>

[7] Ver la guía de la WMO sobre rescate de datos climáticos (Tan *et al.* 2004).

[8] Ver las notas técnicas de la WMO (Aguilar *et al.* 2003 y Brunet *et al.* 2008).

En la figura 2 se muestra un ejemplo de la aplicación exitosa del software para el control de calidad de datos desarrollado por el ETCCDI^[9] a una serie de precipitación centroamericana en la que erróneamente se habían volcado valores de la humedad atmosférica en vez de los de precipitación y, a partir de la cual, se identificó una inesperada alta densidad de datos en las categorías de lluvias entre los 70-80 mm; los valores de humedad fueron identificados y substituidos por los correspondientes datos de precipitación (tomada de Aguilar *et al.* 2005).

Además de la aplicación de los controles de calidad a las series de datos, es necesario comprobar, también, que las variaciones y tendencias que la serie de tiempo inspeccionada responden, exclusivamente, al forzamiento de la variabilidad meteorológica y climática y que, por lo tanto, no están asociadas a otros factores artificiales y espurios, como: los inducidos

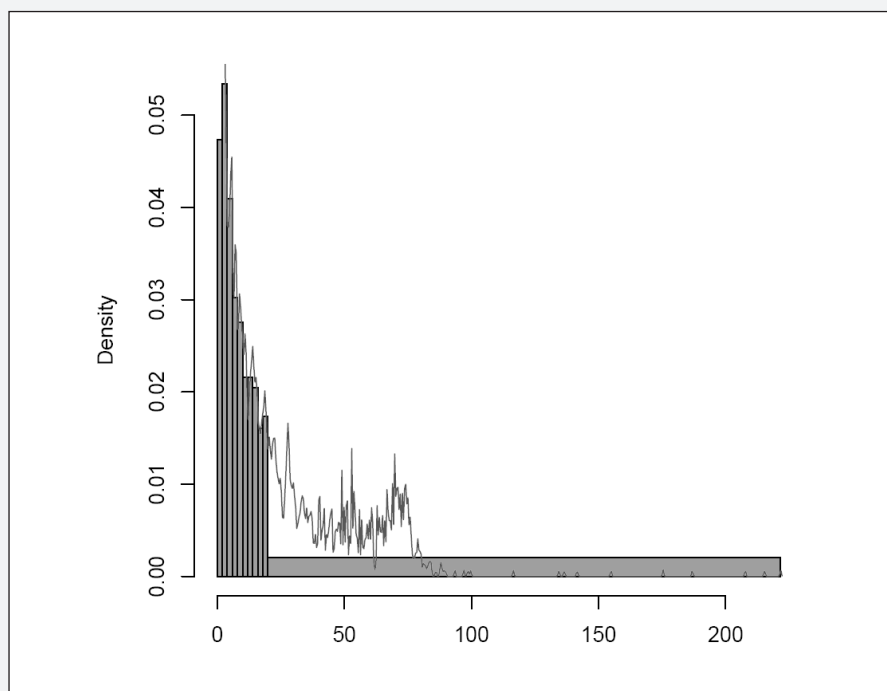
por cambios en el tiempo en la instrumentación, en las prácticas observacionales o en el entorno de los puntos de observación (e.g. Peterson *et al.* 1998).

Un amplio conjunto de factores artificiales pueden introducir rupturas puntuales o graduales en la homogeneidad de cualquier serie de tiempo que pueden ser de magnitud similar e incluso mayor que la verdadera señal climática. Entre los más destacados están los relacionados con los cambios a lo largo del tiempo en la instrumentación, exposición y protección de los instrumentos (e.g. substitución de equipos, cambios en los tipos de protectores de los termómetros), las relocalizaciones de los observatorios, las modificaciones en las prácticas observacionales (e.g. forma de estimar los promedios de una variable, cambios en las horas de observación de una variable) y los relacionados con las modificaciones del entorno de los observatorios (e.g. cambios en los usos y cubiertas del suelo: transformaciones agrícolas, deforestación, urbanización).

[9] <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDI/software.shtml>

Figura 2

Histograma (barras) y filtro de densidad de Kernel (línea) en el que se muestra la distribución de la precipitación acumulada para distintos intervalos de precipitación y se observa una inesperada alta densidad entorno a las clases 70-80 mm de lluvia diaria. Aplicación exitosa del software RclimDex del ETCCDI (<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDI/software.shtml>) a una serie de precipitación centroamericana (Aguilar *et al.* 2005) en la que se habían introducido erróneamente datos de la humedad atmosférica en vez de valores de precipitación



Todos estos factores suelen introducir un sesgo de carácter puntual o abrupto (e.g. una relocalización del observatorio, la sustitución de un viejo instrumento por otro nuevo) o gradual (e.g. tendencias forzadas localmente por la sustitución de cubiertas del suelo o por la influencia de la isla de calor urbana), el cual deberá ser ajustado para poder asegurar que las variaciones contenidas en la serie de tiempo examinada sólo responden a derivas forzadas por el tiempo y el clima.

Es evidente que las estaciones y redes meteorológicas más antiguas se han visto afectadas a lo largo de su historia observacional por un abundante número de estos cambios, lo cual ha provocado, a su vez, que las series de las variables observadas presenten discontinuidades o rupturas de su homogeneidad más abundantes que las series cortas. La homogeneización de las series de tiempo afectadas por cualquier tipo de sesgo se convierte, así, en otra necesidad previa e imprescindible anterior a la utilización de los datos en cualquier estudio climático, especialmente en los estudios de detección y atribución de causas.

Un variado número de métodos se han desarrollado para testar la homogeneidad de las series y homogeneizarlas o ajustarlas, las cuales se hallan disponibles en la actualidad para su uso en el desarrollo de bases de datos de alta calidad y ajustadas a distintas escalas temporales. Las técnicas de homogeneización diseñadas para el ajuste de datos a la escala mensual son mucho más numerosas que las que recientemente se están definiendo y probando en el marco, por ejemplo, de la Acción Europea COST HOME, (*Advances in homogenisation methods of climate series: an integrated approach*)^[10], para homogeneizar datos en base diaria, escala en la que la estimación de ajustes presenta un mayor grado de complejidad.

Un claro ejemplo de la mejora que supone la homogeneización de series temporales del clima lo ofrece el estudio de Caussinus y Mestre (2004), en el que los autores desarrollan una propuesta y la aplican a la red de registros termométricos franceses. En la figura 3 se muestra la distribución espacial de las tendencias de la temperatura del aire en Francia, calculadas antes de haber homogeneizado los datos (figura 3a) y después de haberlos ajustado (figura 3b); como es patente cuando se comparan ambas, los datos inhomogéneos proporcionan una

incoherente distribución espacial de las tendencias, en la cual se evidencia el efecto *ojo de buey* en múltiples ocasiones, mientras que los datos ajustados presentan la esperable coherencia espacial de las tendencias térmicas estimadas.

El control de calidad y la homogeneización de las series temporales del clima es un proceso previo, ineludible y clave al uso de los datos, el cual nos asegurará que los resultados alcanzados por los diversos estudios climáticos, en especial los de detección y atribución de causas, en lo particular, y en lo general, los de cualquier análisis de la variabilidad climática son suficientemente robustos como para poder confiar en los mismos.

Conclusiones

Como se ha evidenciado en este ensayo, los estudios de detección y atribución de causas del cambio climático descansan, en gran medida, en la disponibilidad de datos y registros de alta calidad, los cuales deben estar libres de errores puntuales y, en particular, que sea posible probar que la serie temporal es homogénea.

Desafortunadamente, en la actualidad se cuenta con un menor número de registros de alta calidad de los que se requieren para basar con confianza los estudios y las aplicaciones climáticas, pese a que la atmósfera se ha estado vigilando de manera regular desde mediados del siglo XIX para la mayor parte del globo y con anterioridad en determinadas regiones del planeta (e.g. Europa).

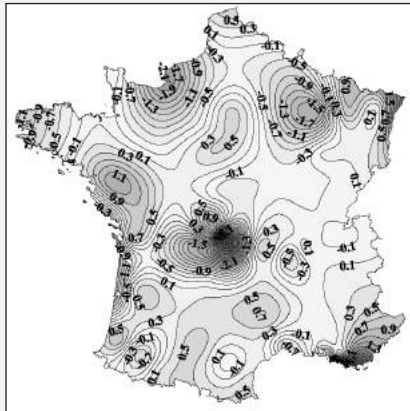
Hoy en día se dispone de menos registros que los que serían necesarios para llevar a cabo análisis fiables de la variabilidad y cambio climático a escalas menores que la global y continental y, muchas veces, los datos de los que disponemos presentan una dudosa calidad que hace al menos cuestionable su utilización en cualquier estudio climático, si previamente no han sido sometidos a procesos de control de calidad y verificación de su homogeneidad u homogeneización, en el caso de que se haya probado que el registro temporal examinado no es homogéneo.

También, la accesibilidad a los datos disponibles, la cual varía en cada país, es otro obstáculo por resolver: los distintos formatos que presentan los datos digitales requieren mucho tiempo para la transferencia al formato requerido para llevar a cabo los análisis. La incompatibilidad que a veces

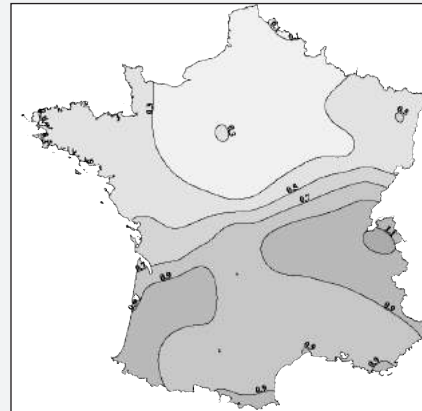
[10] <http://www.homogenisation.org/index.php>

Figura 3

Tendencias espaciales de la temperatura del aire en Francia antes (figura 3a) y después (figura 3b) de haber sometido a las series individuales a un proceso de homogeneización siguiendo la aproximación diseñada por Caussinus y Mestre (2004)



3a



3b

presentan las distintas bases de datos digitales y la escasa interoperabilidad actual entre redes meteorológicas nacionales, junto a la imposición de restricciones al libre acceso a la información con propósitos científicos constituyen la obstructiva problemática que tiene la comunidad científica y a la que se debe responder y resolver adecuadamente esto, si se pretenden mejorar los estudios de detección y atribución de causas del cambio climático e incrementar el conocimiento del reto ambiental más grave al que se enfrenta nuestro planeta. ■

Referencias

- Aguilar, E, I. Auer, Brunet M., T. C. Peterson y J. Wieringa (2003). Guidelines on climate metadata and homogenization. WCDMP-No. 53, WMO-TD No. 1186. Geneve, World Meteorological Organization.
- Aguilar, E., T. C. Peterson, P. R. Obando, R. Frutos, J. A. Retana, M. Solera, J. Soley, I. G. Garcia, R. M. Araujo, A. R. Santos, V. E. Valle, M. Brunet, L. Aguilar, L. Alvarez, M. Bautista, C. Castanon, L. Herrera, E. Ruano, J. J. Sinay, E. Sanchez, G. I. H. Oviedo, F. Obed, J. E. Salgado, J. L. Vazquez, M. Baca, M. Gutierrez, C. Centella, J. Espinosa, D. Martinez, B. Olmedo, C. E. O. Espinoza, R. Nunez, M. Haylock, H. Benavides, R. Mayorga (2005). Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, Vol 10, No. D23, Washington (USA).
- Alexander, L. V., X. Zhang, T. C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A. M. G. K Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. R. Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D. B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci, J. L. Vazquez-Aguirre (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 111, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.
- Allen, M. (2003). Liability for climate change: will it ever be possible to sue anyone for damaging the climate? *Nature*, 421(6926), 891-892.
- Brunet M., O. Saladié, P. Jones, J. Sigró, E. Aguilar, A. Moberg, D. Lister, A. Walther and C. Almarza. (2008). A case-study/guidance on the development of long-term daily adjusted temperature datasets. World Meteorological Organization, WMO-TD-1425/WCDMP-66, Geneva, 43 pp.
- Caussinus, H. and O. Mestre, (2004). Detection and correction of artificial shifts in climate series. *Applied Statistics*, 53, 405-425.
- CCSP, (2008). Weather and Climate Extremes in a Changing Climate. Regions of Focus: North America, Hawaii, Caribbean, and U.S. Pacific Islands. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. [Thomas R. Karl, Gerald A. Meehl, Christopher D. Miller, Susan J. Hassol, Anne M. Waple and William L. Murray (eds.)]. Department

- of Commerce, NOAA's National Climatic Data Center, Washington, D.C., USA, disponible en <http://www.climate-science.gov/Library/sap/sap3-3/final-report/sap3-3-final-all.pdf>
- Gutowski, W. J., G. C. Hegerl, G. J. Holland, T. R. Knutson, L. O. Mearns, R. J. Stouffer, P. J. Webster, M. F. Wehner, F. W. Zwiers, (2008). Causes of Observed Changes in Extremes and Projections of Future Changes. Weather and Climate Extremes in a Changing Climate. Regions of Focus: North America, Hawaii, Caribbean, and U.S. Pacific Islands. T. R. Karl, G. A. Meehl, C. D. Miller, S. J. Hassol, A. M. Waple, and W. L. Murray (eds.). A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Washington, DC.
- Hegerl, G. C., F. W. Zwiers, V. V. Kharin, and P. A. Stott (2004). Detectability of anthropogenic changes in temperature and precipitation extremes. *Journal of Climate*, 17(19), 3683-3700.
- Hegerl, G. C., F. W. Zwiers, P. Braconnot, N. P. Gillett, Y. Luo, J. Marengo Orsini, N. Nicholls, J. E. Penner, and P. A. Stott, (2007) [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller (eds.)]. Understanding and attributing climate change. *Climate Change 2007: The Physical Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK, and New York, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 663-745.
- IPCC, 2007: *Climate Change (2007)* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. The Physical Science Basis. Contribution of working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom and New York, NY, USA Cambridge University Press, Cambridge.
- Katz, R. W. and B. G. Brown (1992). Extreme events in a changing climate: variability is more important than averages. *Climatic Change*, 21(3), 289-302.
- Luterbacher, J., D. Dietrich, E. Xoplaki, M. Grosjean, H. Wanner (2004). European Seasonal and Annual Temperature Variability, Trends, and Extremes Since 1500. *Science*, 303: 1499-1503.
- Mearns, L. O., R. W. Katz, and S. H. Schneider (1984). Extreme high temperature events: changes in their probabilities with changes in mean temperature. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(12), 1601-1613.
- Peterson Thomas C., Xuebin Zhang, Manola Brunet India, Jorge Luis Vázquez Aguirre (2008). Changes in North American extremes derived from daily weather data. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 113, D07113, doi:10.1029/2007JD009453
- Peterson, T. C., D. R. Easterling, T. R. Karl, P. Groisman, N. Nicholls, N. Plummer, S. Torok, I. Auer, R. Böhm, D. Gullett, L. Vincent, R. Heino, H. Tuomenvirta, O. Mestre, T. Szentimrey, J. Salinger, E. J. Førland, I. Hanssen-Bauer, H. Alexandersson, P. Jones, and D. Parker (1998). Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: a review. *Int. J. Climatol.*, 18, 1493-1517.
- Stott, P. A. (2003). Attribution of regional-scale temperature changes to anthropogenic and natural causes. *Geophysical Research Letters*, 30(14), 1724, doi:10.1029/2003GL017324.
- Stott, P. A., D. A. Stone, and M. R. Allen (2004). Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, 432(7017), 610-614.
- Tan L. S., S. Burton, R. Crouthamel, A. van Engelen, R. Hutchinson, L. Nicodemus, T. C. Peterson, F. Rahimzadeh (2004). *Guidelines on Climate Data Rescue*. WMO/TD, No. 1210, Geneva.
- Willett, K. M., N. P. Gillett, P. D. Jones, and P. W. Thorne (2007): Attribution of observed surface humidity changes to human influence. *Nature*, 449(7163), 710-712. doi:10.1038/nature06207
- Zhang, X., F. W. Zwiers, and P. A. Stott (2006). Multi-model multisignal climate change detection at regional scale. *Journal of Climate*, 19(17), 4294-4307.
- Zhang, X., F. W. Zwiers, G. C. Hegerl, N. Gillett, H. Lambert, and S. Solomon (2007). Detection of human influence on twentieth century precipitation trends. *Nature*, 448(7152), 461-465.
- Zwiers, F. W. and X. Zhang, 2003: Toward regional scale climate change detection. *Journal of Climate*, 16(5), 793-797.