

TABLA I

Coste de la generación de electricidad (centavos/kWh) para estaciones disponibles comercialmente, años 2005-2010 (en dólares EE.UU. de 1996) (factor de carga del 75%, 30 años)

| Tecnología reemplazada      | Serie extrema de coste   |                           | Costes promedio representativos |                           |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------|
|                             | Tasa de descuento del 5% | Tasa de descuento del 10% | Tasa de descuento del 5%        | Tasa de descuento del 10% |
| Carbón                      | 2,48-5,64                | 3,74-7,61                 | 4,065                           | 4,99                      |
| Gas natural ciclo combinado | 2,33-7,91                | 2,36-8,44                 | 3,98                            | 4,47                      |
| Torres energéticas          | —                        | —                         | 2,47                            | 3,88                      |

0,67 y 0,8 kg de sal por kWh. Una manera de afrontar este problema es mediante la precipitación temprana de la salmuera rociada. Esto se obtiene intensificando la colisión entre las gotitas, provocando su coalescencia y eliminando los tamaños de gotita inferiores a 300 ó 400  $\mu\text{m}$ .

Los efectos medioambientales producidos por las torres de ruido, visibilidad, vertido de agua salada y sus consecuencias sobre el tráfico aéreo y sobre las aves, parecen menores comparados con los problemas medioambientales que se eliminan. Además de evitar la combustión de carburante, las torres ayudan a resolver los problemas de escasez y salinidad del agua. Al ayudar a la piscicultura de peces marinos, las torres también ayudan en otro problema medioambiental importante: es interesante observar que los peces requieren alrededor del 40 por ciento de la comida que necesita el ganado: otra forma importante de ahorrar una gran cantidad de agua.

## Conclusiones

La tecnología de las torres energéticas es la primera que produce electricidad de fuentes renovables para superar a los caballos de tiro económicos del carbón y del gas. Las únicas tecnologías que compiten con las torres energéticas son la hidroelectricidad, la energía eólica y la biomasa. Todas están dentro del rango económico justificado por el principio del desarrollo sostenible. Los proyectos térmicos solares ya se están aproximando a estos límites, pero no del todo. Todavía son entre 3 y 5 veces más caros.

Las torres energéticas podrían suministrar todo el aumento anticipado de la demanda de electricidad.

## Referencia

- [1] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos y Agencia Internacional de la Energía, 1998: *Costes previstos de generación de electricidad —actualización de 1998.*

# Aspectos climatológicos del Estado de Qatar

Por Ali Hamed AL-MULLA <sup>1</sup>, Mohammed Hassan AL-SULAITI <sup>2</sup> y P. Govinda RAO <sup>3</sup>

## Introducción

El estudio de los datos meteorológicos recogidos durante un período de tiempo suficientemente largo en una región demuestra diversos aspectos de la variabilidad climática. Las observaciones sistemáticas en muchas partes de los países del Consejo de Coopera-

ción del Golfo (CCG) empezaron sólo a mediados de los años cincuenta y principios de los sesenta. Los estudios meteorológicos de la región comenzaron con la exploración del petróleo y del gas natural. En esta era de interacciones enormemente complicadas y sutiles entre los humanos y su entorno, pequeñas variaciones climáticas pueden tener impactos de largo alcance en el bienestar humano. La región del Golfo es más frágil a este respecto debido a su naturaleza árida. El estudio de diversos aspectos climáticos de Qatar proporciona, por tanto, información útil e interesante sobre el Estado, y constituye un estudio de caso para la región del CCG. El Estado de Qatar es una península que ocupa

<sup>1</sup> Director Adjunto de la Autoridad de Aviación Civil y Representante Permanente de Qatar ante la OMM. Correo electrónico: aliali96@qatar.net.qa.

<sup>2</sup> Jefe de la Oficina de Predicción del Servicio Meteorológico.

<sup>3</sup> Funcionario científico del Servicio Meteorológico.

un área de 11 437 km<sup>2</sup> en la costa occidental del Golfo, extendiéndose hacia el norte del Golfo unos 160 km. Tiene una anchura máxima de 88 km. El territorio de Qatar comprende también unas pocas islas. Por consiguiente, el clima de los países del CCG en general, y concretamente el de Qatar, puede describirse como desierto cálido de tipo BWh, según la clasificación de Koppen (Takahashi y Arakawa, 1981). Las características notables son:

- Es seco; las pocas precipitaciones están limitadas mayoritariamente al invierno y la primavera. La mayor parte del conjunto de las precipitaciones deriva de actividad tormentosa cuando sistemas extratropicales ocasionales (a escala sinóptica) se aproximan a la región desde el oeste.
- La estación del verano está caracterizada por temperaturas extremas (altas) y shamales (vientos fuertes del noroeste) y condiciones alteradas del estado del mar durante los períodos de shamal. A veces, a estos vientos están asociadas fuertes tormentas de arena y/o polvo. En esta estación, el tiempo se hace muy sofocante cuando aumentan la humedad y las altas temperaturas.
- La estación del invierno es agradable y, en pocas ocasiones, bajo la influencia de los shamales, el estado del mar se vuelve agitado, afectando de forma adversa a las operaciones submarinas de petróleo y gas. La mayor parte de las precipitaciones anuales están limitadas a esta estación, y en su mayoría son contribución de tormentas desencadenadas por sistemas de latitud media de paso sobre la región.

- La región ha estado desarrollándose muy rápidamente en las últimas décadas, en términos de industrialización, urbanización y estándar de vida (comodidades modernas). Relacionados con estos factores o no, muchos parámetros climáticos están mostrando cambios significativos.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente artículo está enfocado como sigue: (a) el clima general de Qatar con información sobre fenómenos extremos; (b) cambios climáticos recientes; (c) aparición de tormentas; y (d) shamales.

### Clima general de Qatar con información sobre los extremos

El clima de Qatar es básicamente árido. El análisis de factores de Ali (1996) muestra que la temperatura mensual media es inferior a 20°C en los meses de invierno, y superior a 30°C en la estación de verano. Aparecen algunas precipitaciones en las estaciones de verano y primavera. Aunque el calentamiento de la tierra es muy alto durante los meses veraniegos de junio, julio y agosto, la región está libre de actividad pluvial debido a la influencia de un anticiclón subtropical. La temperatura media diaria durante junio, julio y agosto en Doha es de 33,9°C, 34,7°C y 34,3°C, respectivamente. La temperatura máxima media diaria en estos meses es de 41,2°C, 41,5°C y 40,7°C. Los valores climatológicos normales (1962-1990) de temperatura mínima media para diciembre, enero y febrero son de 14,9°C, 12,7°C y 13,7°C, respectivamente. En marzo sube a 16,8°C. La temperatura mínima media no cae por debajo de 10°C en ningún mes del invierno.



Figura 1 — Las tormentas de arena son una característica común en Qatar durante los meses de primavera y verano y a menudo acompañan al shamal (foto tomada el 24 de abril de 1989)

La dirección del viento predominante sobre el Estado es principalmente norte-oeste. Aparecen otras direcciones del viento, pero con una frecuencia menor. Dependiendo del momento del año en que aparecen, se les denomina a menudo "shamales de verano" o "shamales de invierno". Los shamales de verano aparecen habitualmente durante unos 40 días entre mayo y julio, con una considerable variación interanual. En algunas ocasiones, se observan tormentas de arena/polvo, asociadas con los shamales.

La frecuencia de las tormentas en el Golfo está bien correlacionada con la distribución de precipitaciones. La migración de borrascas y anticiclones de latitud media sobre la región del Golfo desde el noroeste tiene lugar desde finales de noviembre a marzo (abril en algunos años). El mecanismo desencadenante necesario para el desarrollo de la actividad tormentosa se encuentra principalmente en estos sistemas sinópticos de latitud media que se aproximan al Estado desde el noroeste.

La Tabla 1 resume las variables climatológicas importantes de la capital, Doha, para la que han estado disponibles observaciones meteorológicas desde 1962. La información sobre algunas condiciones meteorológicas y climáticas extremas se da en la Tabla II.

### Cambios recientes en diversos elementos climatológicos

Se ha realizado el análisis de tendencias lineales de algunas variables climatológicas estudiando sus implicaciones en los recursos hídricos (Rao y Ali, 2001). Además, se han realizado análisis de algunos otros parámetros, tales como la temperatura máxima media, la temperatura mínima media, el intervalo diurno, el número de días con tormenta y niebla. Los resultados se resumen en la Tabla III.

Para descubrir los cambios en los diversos parámetros climatológicos, se calcularon las anomalías (valor individual del año — valor a largo plazo de la serie) para estos parámetros. Excepto en las precipitaciones y en la temperatura máxima media, se encontraron tendencias significativas en todos los parámetros (Tabla III). Se encontraron tendencias sistemáti-

camente crecientes en la temperatura del aire en superficie, la temperatura mínima media, la evaporación, la evapotranspiración y el número anual de días con tormentas. Se observaron tendencias decrecientes significativas en el intervalo diurno de temperaturas, la velocidad media del viento, el balance hídrico y el número anual de días con niebla. Por razones de espacio, se muestran aquí sólo las figuras relativas a la temperatura y la precipitación (figuras 2-5). Durante el período de 38 años de estudio, la precipitación anual varió desde 0,4 mm en 1962 a 302 mm en 1964. Se observa también una característica similar en la escala mensual. En Doha, en 1964, cayó una cantidad de 80,1 mm en solo 24 horas, que es casi equivalente al valor medio anual. Debido a su alta variabilidad, la distribución de la precipitación en las regiones áridas, como Oriente Medio, es casi gaussiana (normal); se utiliza la magnitud normalizada  $Q$ , sugirió Kendall (1970) y como adoptaron otros estudiosos (Sneyers, 1990; Denhard y Schonniese, 1992).

El aspecto más importante que surge del análisis de la tendencia es que un calentamiento climático significativo en la región produce una considerable pérdida de agua por evaporación/ evapotranspiración. La tendencia de la precipitación en la región no es significativa, y no contribuye a ninguna compensación del aumento de la evapotranspiración. La región escasa en agua de Qatar está, por tanto, enfrentándose a más estrés de humedad relacionado con el clima.

### Tormentas en Qatar

Un estudio detallado de Rao y otros (2001(a)) extrae los siguientes aspectos importantes relacionados con la actividad tormentosa en Qatar.

- El número medio anual de días con tormenta es de 7,6, de los cuales aproximadamente un 75 por ciento ocurren durante febrero-abril.
- Los meses veraniegos de junio-septiembre están desprovistos de tormentas.
- El análisis de la tendencia de los días de tormenta anuales durante 1962-1999 mostró un aumento constante significativo en las últimas décadas.

TABLA I

Resumen de algunos elementos climatológicos en Doha a nivel de superficie (1962-1990)

| Elemento                                | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Sep. | Oct. | Nov. | Dic. | Anual |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Temperatura del aire media diaria (°C)  | 17,0 | 18,0 | 21,4 | 25,8 | 31,1 | 33,9 | 34,7 | 34,3 | 32,3 | 28,9 | 24,2 | 19,1 | 26,7  |
| Temperatura máxima media diaria (°C)    | 21,8 | 23,0 | 27,0 | 31,9 | 38,3 | 41,2 | 41,5 | 40,7 | 38,7 | 35,2 | 29,5 | 24,1 | 32,7  |
| Temperatura mínima media diaria (°C)    | 12,7 | 13,7 | 16,8 | 20,5 | 24,9 | 27,7 | 29,1 | 28,9 | 26,4 | 23,3 | 19,5 | 14,9 | 21,5  |
| Precipitaciones mensuales medias (mm)   | 13,8 | 17,3 | 16,2 | 9,1  | 3,8  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,8  | 3,5  | 11,1 | 6,3   |
| Humedad relativa media diaria (%)       | 71   | 70   | 64   | 53   | 44   | 43   | 49   | 56   | 62   | 63   | 66   | 71   | 59    |
| Velocidad del viento media diaria (m/s) | 4,2  | 4,5  | 4,7  | 4,6  | 4,7  | 5,2  | 4,3  | 4,2  | 3,4  | 3,6  | 3,9  | 4,0  | 4,3   |

TABLA II

Algunas estadísticas sobre fenómenos climáticos y meteorológicos extremos en Doha

| Descripción del fenómeno                          | Valor     | Año/periodo/día                                 |
|---|-----------|---|
| Temperatura media anual más alta                  | 28,2°C    | 1998  |
| Temperatura máxima media anual más alta           | 33,8°C    | 1998  |
| Temperatura mínima media anual más baja           | 20,4°C    | 1964  |
| Temperatura media mensual más alta                | 36,3°C    | junio de 1999, julio y agosto de 1998           |
| Temperatura máxima media mensual más alta         | 43,8°C    | junio de 1972                                   |
| Temperatura mínima media mensual más baja         | 10,0°C    | enero de 1964                                   |
| Temperatura máxima absoluta más alta              | 49,6°C    | 9 de julio de 2000                              |
| Temperatura mínima absoluta más baja              | 3,8°C     | 21 de enero de 1964                             |
| Mayor precipitación estacional (noviembre-abril)  | 229,7 mm  | 1964-1965                                       |
| Mayor precipitación anual                         | 302,8 mm  | 1964  |
| Mayor precipitación mensual                       | 155,4 mm  | diciembre de 1964                               |
| Mayor cantidad de lluvia registrada en 24 horas   | 80,1 mm   | 19 de enero de 1964                             |
| Intensidad de precipitación observada más alta    | 44,3 mm/h | 10 de noviembre de 1976                         |
| Mayor velocidad de viento sostenida en 10 minutos | 21 m/s    | marzo de 1988 y noviembre de 1982               |
| Mayor velocidad de viento sostenida en una hora   | 19 m/s    | mayo de 1977 y noviembre de 1982                |
| Mayor racha observada                             | 47 m/s    | en Ras Abu Aboud el 15 de diciembre de 1989     |
|   | 28 m/s    | en el aeropuerto de Doha el 13 de marzo de 1995 |

- La aparición de tormentas es más probable de noche y a primeras horas de la mañana. El sistema sinóptico más favorable para el desarrollo de tormentas en Qatar es la presencia de una zona de baja presión sobre las partes centrales de Arabia Saudí y/o un surco de baja presión norte-sur a lo largo de una longitud de aproximadamente 45°E con movimiento hacia el este.
- El análisis termodinámico revela que las condiciones termodinámicas combinadas, es decir

$K \geq 20^{\circ}\text{C}$ ,  $L1 \geq -5^{\circ}\text{C}$  y  $L2 \geq -15^{\circ}\text{C}$  (donde K es el índice de humedad del estrato 850-700 hPa; y L2 es el índice de humedad del estrato 600-500 hPa), pueden utilizarse como predictores potenciales para la predicción de tormentas en Qatar (Rao y otros, 2001(a)).

Shamales

“Shamal” es la palabra árabe para “norte”, y es el nombre dado a los vientos fuertes del norte-oes-

TABLA III

Resumen de los resultados del análisis de las tendencias de diferentes variables climatológicas en Doha, Qatar

| Variable (número de años de datos considerado) N | Media    | Desviación típica | T de Mann Kendall | Valor significativo (nivel de confianza) |         |
|--|----------|-------------------|-------------------|--|---------|
|  |          |                   |                   | 95%                                      | 99%     |
| Temperatura del aire en superficie, °C (N = 38)  | 26,8     | 0,52              | +0,272*           | ± 0,222                                  | ± 0,263 |
| Temperatura máxima media anual, °C (N = 38)      | 32,7     | 0,58              | -0,045            | ± 0,222                                  | ± 0,263 |
| Temperatura mínima media anual, °C (N = 38)      | 21,8     | 0,78              | 0,631*            | ± 0,222                                  | ± 0,263 |
| Intervalo diurno de temperaturas, °C (N = 38)    | 10,9     | 0,75              | -0,65*            | ± 0,222                                  | ± 0,263 |
| Precipitación anual, mm (N = 38)                 | 83,4     | 70,9              | Q = 0,891         | Q > 2                                    | Q > 3   |
| Velocidad media del viento, m/s (N = 26)         | 4,3      | 0,50              | -0,772*           | ± 0,273                                  | ± 0,325 |
| Evaporación anual, mm (N = 24)                   | 3 221,5  | 232,9             | +0,413*           | ± 0,286                                  | ± 0,339 |
| Evapotranspiración anual, mm (N = 24)            | 2 372,2  | 167,9             | +0,391*           | ± 0,286                                  | ± 0,339 |
| Balance hídrico anual, mm (N = 24)               | -2 282,9 | 180,8             | -0,355*           | ± 0,286                                  | ± 0,339 |
| Número anual de días con tormenta (N = 38)       | 7,6      | 5,3               | 0,357*            | ± 0,222                                  | ± 0,263 |
| Número anual de días con niebla (N = 38)         | 18,2     | 7,6               | -0,390*           | ± 0,222                                  | ± 0,263 |

\* significativo con un nivel de confianza del 99%.

te/norte. Al estar exentos de perturbaciones de onda de frente, los shamales de verano no están asociados con ningún tiempo, excepto las neblinas de polvo que originan una baja visibilidad. Se han estudiado bien los shamales de verano en los últimos años (Ali, 1992 y 1994; Hatwar y otros, 1999). Aparecen generalmente de mayo a mediados de julio y están asociados a borrascas térmicas relativamente fuertes en la India y Arabia. Los shamales de invierno son de duración más corta. Aparecen de noviembre a marzo y a menudo están acompañados de condiciones meteorológicas adversas, tales como tormentas, turbulencia, descensos de temperatura, mar gruesa, etc. Perrone (1979) estudió diversos aspectos sinópticos de los shamales de invierno en el Golfo. Ha relacionado principalmente los fenómenos con el gradiente térmico existente entre la masa de aire frío advectada sobre la República Árabe Siria y las zonas circundantes y la masa de aire caliente predominante sobre el Golfo septentrional y central.

Rao y otros (2001(b)) han definido un "día de shamal" como un día en el que la dirección del viento en superficie es norte-oeste o norte, y la velocidad media por hora del viento es de 9 m/s y superior al menos tres horas al día. Utilizando los datos del viento por hora (dirección y velocidad) y adoptando este criterio, se han identificado los días de shamal en su período de estudio de 1990-1999 y se han extraído muchas conclusiones interesantes (Rao y otros, 2001(b)). A continuación se proporciona un breve resumen de los shamales de verano e invierno.

#### Shamales de verano

Se ha determinado que el número medio de días de shamal durante mayo-julio es de 23,4, siendo el número máximo de 8,8 días en junio. Se observa que la fuerza del viento es máxima a aproximadamente las 10:00 UTC (13:00 hora local) y mínima a aproximadamente las 20:00 GMT. Esto es debido principalmente a las características de variación diurnas y a los efectos de la brisa tierra-mar. La temperatura del aire se modera durante los días de shamal debido a una mejor mezcla de las moléculas de aire en la atmósfera. Por lo tanto, no aparecen temperaturas extremas altas durante los períodos de shamal. Se ha constatado asimismo que, durante los años con menos días de shamal de verano, el número de días con temperaturas extremas es alto. Se ha determinado también que la humedad relativa en la atmósfera se reduce pronunciadamente en estos días. (Para más detalles sobre shamales de verano, véase Hatwar y otros, 2000).

Los días de tormenta de arena o polvo en Doha están acompañados por brisas frescas o fuertes (9 m/s o más), que reducen la visibilidad horizontal a menos

de 1 000 m. El número medio de tormentas de arena/polvo es menor en Qatar en comparación con otros países del CCG, tales como Kuwait. El número medio anual (1962-1990) de días de tormenta de arena/polvo en Qatar es sólo de 5,9, en comparación con los 27 días de Kuwait. Un estudio regional reveló que Qatar es menos proclive a tormentas de arena/polvo (Littman, 1991). Aunque pueden aparecer en cualquier mes del año, su probabilidad de aparición en Qatar es alta durante junio y julio, con un número medio de 1,3 días.

#### Shamales de invierno

- El número medio de shamales de invierno (período de noviembre-marzo) en un año es de 12,1: aproximadamente el 26 por ciento de los días de shamal anuales.
- Alrededor del 43 por ciento de los shamales de invierno aparecen en la estación climatológica general de invierno, de diciembre a febrero. El otro 57 por ciento tiene lugar en noviembre y marzo.
- La velocidad media diaria del viento durante los shamales de invierno es más alta en marzo y más baja en noviembre.
- El porcentaje más alto de vientos shamales aparece durante las 06:00-11:00 UTC (09:00-14:00 h, hora local). El 66 por ciento de los vientos shamales en noviembre, el 56 por ciento en febrero y marzo y el 45 por ciento en enero ocurren durante estas horas.
- Las condiciones de brisas fuertes ( $\geq 11$  m/s y  $\leq 14$  m/s) aparecen en un 10 por ciento y un 15 por ciento de las horas totales de shamal en febrero y marzo, respectivamente. Son menores en diciembre, con sólo un 2 por ciento.
- De media, únicamente alrededor del 2 por ciento de las horas de shamal en noviembre, y del 1 por ciento en marzo alcanzan fuerzas de temporal (velocidad media del viento por hora  $\geq 14$  m/s y  $\leq 17$  m/s).

#### Conclusiones finales

Este artículo se ha preparado teniendo en mente un amplio espectro de lectores y la intención de mantenerse al día de los últimos esfuerzos del Servicio Meteorológico Nacional. Se espera que los aspectos del clima general de la región proporcionen no sólo una idea sobre el clima de Qatar, sino que den también un amplio esbozo de las condiciones climáticas del Golfo. Los resultados del análisis de tendencia de las diversas variables climatológicas se encuentran, en general, en consonancia con los obtenidos para el hemisferio norte en conjunto. La tendencia de calentamiento significativa sin un aumento considerable de la tendencia de la precipitación está causando graves condiciones de estrés de humedad en esta región árida. Los

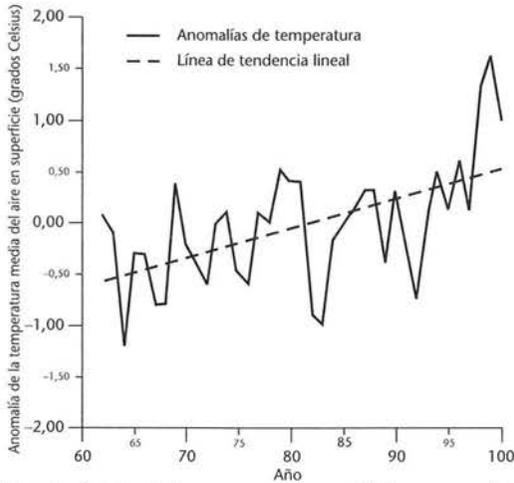


Figura 2 – Variación de la temperatura media anual del aire en superficie, 1962-2000, en el aeropuerto internacional de Doha, junto con la línea de tendencia

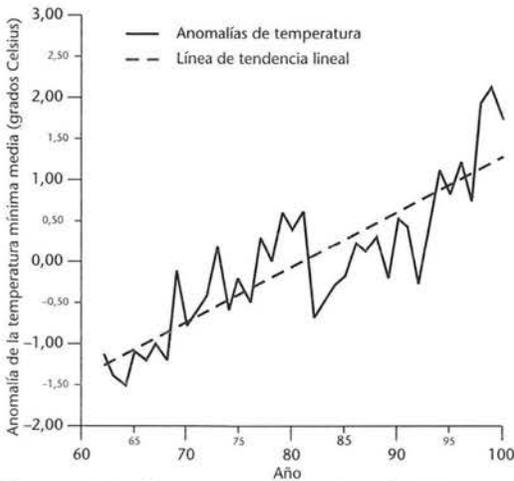


Figura 4 – Variación de la temperatura mínima media anual, 1962-2000, en el aeropuerto internacional de Doha, junto con la línea de tendencia

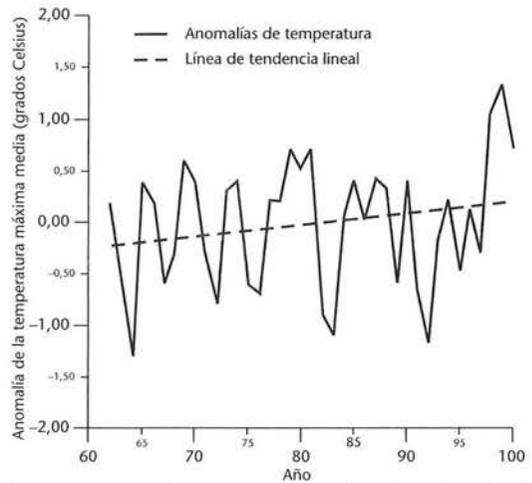


Figura 3 – Variación de la temperatura máxima media anual, 1962-2000, en el aeropuerto internacional de Doha, junto con la línea de tendencia

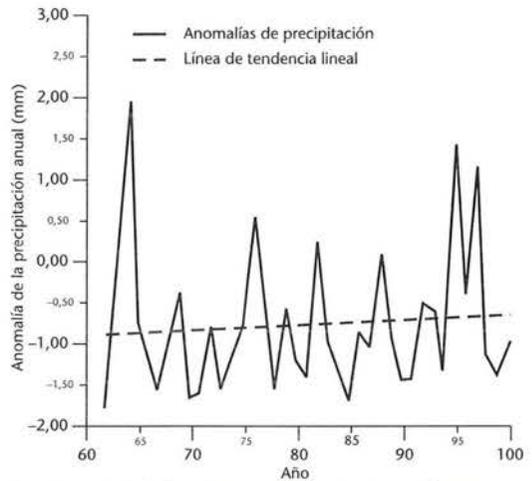


Figura 5 – Variación de la precipitación anual, 1962-2000, en el aeropuerto internacional de Doha, junto con la línea de tendencia

resultados tales como una tendencia decreciente significativa de la velocidad del viento, del número de días con niebla, etc., genera interés por un análisis detallado. El shamal es una característica meteorológica local importante de la región del CCG y tiene una fuerte influencia sobre las actividades diarias de la industria del petróleo y del gas natural. Un análisis detallado de este fenómeno ha proporcionado una información útil para los ingenieros implicados en el sector del petróleo y del gas.

## Referencias

AL-MULLA, ALI H., 1992; Wind meteorology of summer shamal over Arabian Gulf. No publicado. Tesis de licenciatura, Boston University, Boston, EE.UU.  
DENHARD, M. y C. D. SCHONNIESE, 1992: Non-parametric trend statistics and rank correlation of long European sea-level pressure time series. En: *Quinta Reunión Interna*

*cional sobre Climatología Estadística*, American Meteorological Society, Environment Canada (Eds.) 575-578.  
HATWAR, H. R., P. G. RAO, M. SULAITI y ALI H. AL-MULLA, 1999: *Some Characteristics of Summer Shamals over Arabian Gulf and Neighbourhood Region*. Informe técnico del Departamento de Aviación Civil y Meteorología, Doha, Qatar.  
HATWAR, H. R., M. H. AL-SULAITI y ALI H. AL-MULLA, 2000: *Summer Shamals over Arabian Gulf and Associated Upper Air Systems*. Informe técnico del Ministerio de Comunicaciones y Transportes, Departamento de Aviación Civil y Meteorología, Qatar.  
KENDALL, M. G., 1970: *Rank Correlation Methods*. Griffin (cuarta edición), Londres.  
LITTMAN, T., 1991: Dust storm frequency in Asia: climatic control and variability. *International Journal of Climatology*, 11, 393-412.  
PERRONE, T. J., 1979: Winter shamal in the Persian Gulf. Informe Técnico TR-79-06. Naval Environmental Prediction Research Facility, Monterey, California 93940.

RAO, P. G., H. R. HATWAR y M. AL-SULAITI, 2001(a): Thunderstorms over Qatar. *Theoretical and Applied Climatology* (enviado).

RAO, P. G., M. AL-SULAITI y ALI H. AL-MULLA, 2001(b): Winter shamals in Qatar, Arabian Gulf. *Weather* (aceptado para publicación).

SNEYERS, R., 1990: *On the statistical analysis of series of observations*. OMN-N.º 415, Ginebra.

TAKAHASHI, K. y H. ARAKAWA, 1981: Climates of Southern and Western Asia. *World Survey of Climatology*, 9, 215-228.

## Observaciones sobre el Proyecto Italiano de Intensificación de la Lluvia

Por Abele NANIA \*

62

Una red pluviométrica extensa y densa es un requisito fundamental para cualquier proyecto de intensificación de la lluvia. La selección de zonas experimentales (objetivo y de control) depende por completo de los análisis estadísticos de la climatología disponible de la región, con especial atención al banco de datos pluviométricos. Para obtener resultados con una significación estadística aceptable se necesitan una red pluviométrica de alta densidad, un experimento de larga duración y el uso de metodologías aleatorias de siembra.

Algunas conclusiones discutibles obtenidas de numerosos experimentos de intensificación de la lluvia en el pasado han estimulado el desarrollo de modos alternativos para valorar los resultados de la siembra basados en datos experimentales y en evidencia física. En el diseño del proyecto italiano de Puglia (cruce aleatorio) [1], TECNAGRO\* ha intentado el análisis con el uso combinado de:

- Datos de la red pluviométrica de alta densidad, que consta de 80 pluviómetros.
- Un modelo numérico (situado en la parte occidental de la zona experimental [2]) para estudiar la influencia de la orografía en las corrientes de aire horizontales y verticales.

*Un análisis adicional del conjunto de datos de observación recogidos durante el Proyecto Italiano de Intensificación de la Lluvia (1986-1995), ofrece la oportunidad de hacer algunas observaciones sobre los resultados de la siembra de nubes que surgen de patrones de precipitación representados a través de imágenes de radar. Se sugiere una nueva clasificación de los resultados y se presentan algunas ideas para la futura optimización de la tecnología de intensificación de la lluvia.*

- Observaciones de radar (reflectividad, evolución de la altura máxima de nubes y totales de precipitación [3]).
- Unidades experimentales flexibles (siembra tres horas más para permitir a las gotitas de nube inducidas crecer hasta un tamaño precipitable [4]).

Durante los estudios preliminares, se consideraron los ecos significativos en las imágenes de radar como evidencia visual válida a favor de la relación causa efecto entre la siembra de nubes y la lluvia inducida. Por lo tanto, se incluyeron los ecos de radar en los criterios para valorar los resultados de la siembra.

Se consideró importante comparar los datos de la red pluviométrica en la zona objetivo con los de

la zona de control. La suposición implícita era que los resultados de la siembra (si se llegaban a dar) podrían encontrarse siempre dentro de la zona objetivo, siguiendo el calendario de siembra aleatoria. Esta suposición desató una crítica justificable durante el proyecto, porque el flujo de aire deformado orográficamente sobre el recorrido de control y su proximidad a la zona objetivo y de siembra fueron responsables, de forma clara, de importantes diferencias en la valoración de los efectos de la siembra de nubes sobre el suelo.

La velocidad horizontal del viento y las corrientes ascendentes de origen orográfico contribuyeron a la caída de precipitación inducida adicional a sotavento de la línea de siembra. En el proceso termodinámico

\* Antigo Jefe del Servicio Meteorológico Italiano y Director de la Escuela Internacional de Meteorología del Mediterráneo de Erice. En la actualidad, Coordinador Científico de TECNAGRO (una asociación sin ánimo de lucro para la difusión de información tecnológica), Roma.